

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ РАБОТЫ PDC-ДОЛОТ В НЕОДНОРОДНЫХ ПОРОДАХ С
УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА И ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Тошов Ж.Б., Эркинов Д.И., Юнусов Ж.Ф.

*Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, Узбекистан.*

Doi: 10.5281/zenodo.21590241

АННОТАЦИЯ В статье рассматриваются механические и динамические особенности работы PDC-долот при бурении неоднородных по прочности и структуре пород, включая влияние вибрационных режимов на стабильность разрушения породы, энергоэффективность процесса и скорость износа режущих элементов. Особое внимание уделено анализу механизмов возникновения продольных, крутильных и поперечных колебаний, а также их взаимному усилению при переходах между мягкими и твёрдыми пластами. Выполнено сопоставление механико-математических, энергетических и эмпирических моделей, применяемых для описания взаимодействия долота с породой, включая зависимости скорости проходки от осевой нагрузки и частоты вращения, критерии удельной механической энергии разрушения и методы диагностики неустойчивых режимов. Показано, что вибрации приводят к росту энергетических затрат, нарушению равномерности резания и ускоренному износу режущих элементов, включая сколы, термомеханическое разрушение и усталостные повреждения. На основе анализа моделей и экспериментальных наблюдений предложены инженерные решения для снижения вибраций, повышения стабильности работы долота и оптимизации режима бурения в сложно переслащенных разрезах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА PDC-долото, неоднородные породы, вибрации, прерывистое вращение, износ резцов, скорость проходки, механические и энергетические модели бурения.

Введение

Бурение скважин в геологически неоднородных разрезах сопровождается множеством технических трудностей и неопределённостей. В разрезах нередко чередуются мягкие и твёрдые породы, присутствуют трещиноватые участки и каверны, что вызывает резкие изменения в режиме бурения: скачки скорости проходки, потери бурового раствора, ускоренный износ инструмента. Особенно критична ситуация при вскрытии трещиноватых зон, когда возможно внезапное поглощение раствора, вынуждающее приостановить работы и приводящее к дорогостоящим простоям [4].

Геологическая неоднородность сказывается на механизме разрушения пород: переход с мягких пластов (глины) на крепкие (песчаники, базальты) способен вызвать колебательные резонансные явления в системе «бурильная колонна - долото», особенно при некорректных параметрах режима бурения [3]. Это повышает риск разрушения долота, в том числе за счёт крутильных и осевых вибраций [2]. Поликристаллические алмазные долота (PDC) остаются основным типом бурового инструмента при роторном способе бурения. Современные конструкции с упрочнённой

матричной композицией и оптимизированной геометрией резцов демонстрируют высокую износостойкость и стабильную работу в диапазоне от мягких до среднекрепких пород. Однако при переходах через интервалы с резко отличающейся прочностью и абразивностью даже самые современные PDC-долота подвергаются усиленным вибрациям, ударным нагрузкам и неравномерному износу [1, 5].

В ответ на эти вызовы буровая отрасль предлагает несколько технических решений. Разрабатываются гибридные долота, совмещающие алмазные резцы и шарошечные элементы, что позволяет проходить сложные участки разреза без смены инструмента. В компоновку низа колонны внедряются демпфирующие модули и противовзятжные инструменты (например, AST), уменьшающие уровень вибраций. Также реализуются автоматизированные системы регулирования параметров бурения, в том числе системы верхнего привода с возможностью динамической корректировки скорости вращения и нагрузки на долото [7, 6].

Вибрационные процессы при бурении существенно влияют на качество разрушения породы и срок службы долота. Основными типами

колебаний буровой колонны являются продольные (осевые), вращательные (крутильные) и поперечные (боковые). Продольные колебания возникают из-за периодического отрыва долота от забоя, что приводит к ударам и снижению скорости проходки. Вращательные проявляются в остановках и резких рывках долота вследствие накопления и последующей разрядки крутящего момента. Поперечные колебания связаны с нарушением соосности, при котором долото нестабильно вращается и ударяет по стенкам скважины, вызывая интенсивный боковой износ.

Эти виды колебаний часто действуют одновременно, усиливая друг друга, и являются одной из основных причин преждевременного выхода из строя поликристаллических алмазных долот. Вибрации вызывают усталостные трещины, разрушение алмазного слоя и повреждение корпуса, а также отрицательно влияют на надёжность измерительного оборудования. Контроль вибраций необходим для поддержания высокой скорости проходки и снижения аварийности.

Цель работы - проанализировать особенности функционирования PDC-долот в неоднородных по

прочности породах, определить закономерности их износа в вибрационных режимах и рассмотреть применяемые модели, описывающие эти процессы.

Методология

В работе использован комплексный подход, сочетающий теоретический анализ, математическое моделирование и обобщение полевых данных. Основное внимание уделено четырём классам моделей, применяемых для анализа работы PDC-долот в неоднородных породах.

Механико-математические модели опираются на законы механики сплошной среды и контактного взаимодействия резца с породой. Классическая зависимость для оценки скорости проходки предложена В. К. Маурером [1], где скорость механического углубления выражается через осевую нагрузку и частоту вращения. В обобщённом виде связь может быть представлена формулой:

$$v = k P^m n^p \quad (1)$$

что показывает чувствительность скорости к колебаниям нагрузки и вращения.

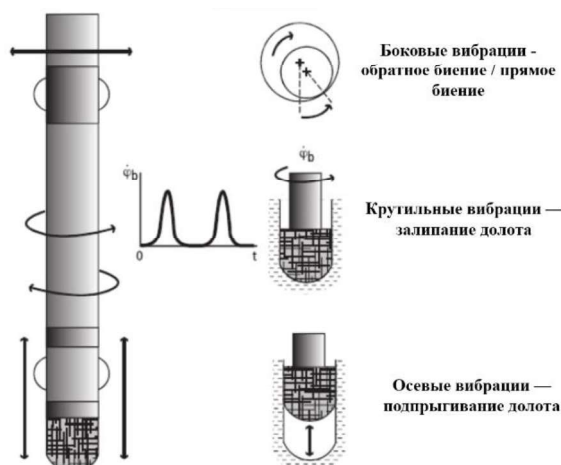


Рис.1. Типы вибраций буровой колонны при работе долота: (а) осевые (подпрыгивание долота), (б) крутильные, в (рывки при вращении), (с) боковые (прецессионное биение). Вибрации долота вызывают ударные нагрузки, неравномерное разрушение породы и ускоренный износ резцов

Современные численные схемы А. Н. Петрова и С. В. Гаврилюка [2] описывают динамику системы «станок — колонна — долото — порода» с использованием уравнения крутильных колебаний:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{прив} - M_{пор} \quad (2)$$

где изменение момента сопротивления породы $M_{пор}$ при переходе через более твёрдый пласт вызывает падение угловой скорости. Это приводит к появлению режима прерывистого вращения долота: периодов «залипания» на забое, когда

скорость почти равна нулю, и последующих резких проворотов.

Исследования М. А. Сидорова и И. Л. Кузнецова [3] показывают, что прерывистое вращение формирует динамическую составляющую крутящего момента:

$$M_{дин} = c \Delta\omega, \quad (3)$$

что создаёт ударные нагрузки на резцы и усиливает их износ.

Геомеханическая модель А. В. Баркова [4] учитывает влияние трещиноватости породы:

$$\sigma_{эфф} = \sigma_0(1 - \alpha f), \quad (4)$$

и показывает, что ослабленные зоны вызывают дополнительные колебания и способствуют переходу к прерывающемуся вращательному режиму, поскольку долото то резко утыкается в твёрдую прослойку, то проваливается в разрушенную.

Энергетические модели оценивают эффективность бурения через удельную механическую энергию разрушения породы. Базовый критерий, предложенный Р. Тезлом [5], имеет вид:

$$E_{\text{мех}} = \frac{P}{F} + \frac{2\pi M}{Fv}, \quad (5)$$

где P — осевая нагрузка, M — крутящий момент, v — скорость проходки, F — площадь долота. При развитии вибраций знаменатель уменьшается, а M и неравномерность нагрузки растут, что приводит к увеличению $E_{\text{мех}}$. Именно эта энергия является индикатором перехода к неэффективному режиму резания.

Многочисленная схема А. Т. Бургуйна и Ф. С. Янга [6] использует диаграммы «нагрузка—частота вращения», где граница устойчивости приближённо описывается зависимостью:

$$n_{\text{кр}} = C \sqrt{\frac{P}{D}}, \quad (6)$$

что позволяет рассчитывать безопасный диапазон частот вращения долота.

Работы А. А. Павлова и С. Н. Григорьева [7] показывают, что оптимизация режима возможна через минимизацию чувствительности удельной энергии к изменению нагрузки:

$$\frac{dE_{\text{мех}}}{dP} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Такая связь подчёркивает отличие энергетических моделей от механико-математических: если первые фиксируют эффект вибраций на энергию разрушения, то вторые описывают зарождение самих вибраций.

Кинематические модели описывают геометрию и движение инструмента и используются для прогноза траектории и предупреждения искривлений. Т.Ш. Ахмедов и К.Н. Ибрагимов [8] применяют данные 3D-сеймики и ГИС для раннего выявления разломов. Методика О.И. Ильмендеевой и В.А. Носова [9] использует данные каротажа во время бурения для адаптации параметров промывки и траектории в сложных пластах.

Эмпирические и нейросетевые модели основываются на обработке больших массивов данных бурения. Такие подходы используют регрессионные зависимости, статистические признаки и нестационарные параметры режима для выявления закономерностей, недоступных традиционному анализу. Нейросетевые алгоритмы, реализованные А. С. Киселёвым и С. В. Нечаевым [10], формируют прогноз вероятности осложнений на основе набора входных

параметров. В простейшем виде входной вектор может быть представлен как:

$$X = \{P, n, M, \Delta p, Q, E_{\text{мех}}\}, \quad (8)$$

где: P — нагрузка на долото, n — частота вращения, M — крутящий момент, Δp — перепад давления, Q — расход промывочной жидкости, $E_{\text{мех}}$ — удельная энергия разрушения.

Нейросетевая модель рассчитывает вероятность осложнения как нелинейное отображение входов:

$$Y = f(X), \quad (9)$$

где Y — вероятность прихвата, поглощения или перехода к прерывистому вращению.

Для повышения устойчивости прогноза гибридные модели, использованные Е. Г. Гуриновым и Н. Ю. Ключниковым [11], объединяют физические зависимости и статистическую аппроксимацию. В обобщённом виде это выражается как:

$$Y_{\text{итог}} = \lambda Y_{\text{физ}} + (1 - \lambda) Y_{\text{стат}}, \quad (10)$$

где: $Y_{\text{физ}}$ — прогноз на основе физических моделей (энергетических или механико-математических), $Y_{\text{стат}}$ — нейросетевой или регрессионный прогноз, λ — весовой коэффициент согласования.

В промышленной практике системы типа LOGIX [12] интегрируют геологические данные, телеметрию, параметры режима бурения и позволяют в реальном времени корректировать выбор нагрузки и частоты вращения для предотвращения развития вибрационного режима. Например, при обнаружении роста механической энергии разрушения:

$$E_{\text{мех}}^{(t+1)} - E_{\text{мех}}^{(t)} > \Delta E_{\text{кр}}, \quad (11)$$

система автоматически снижает частоту вращения или увеличивает подачу промывочной жидкости для стабилизации процесса.

Результаты

Исследование показало, что бурение по разрезам с чередующимися по твёрдости пластами характеризуется выраженной динамической неустойчивостью. В мягких интервалах долото работает в квазистационарном режиме, формируя равномерную стружку. При выходе на более прочные включения сопротивление породы возрастает скачкообразно, что инициирует автоколебательные процессы в системе «буровой привод - буровая колонна - долото». Наиболее характерным проявлением является снижение средней угловой скорости и рост амплитуды крутящего момента, что наблюдается при развитии крутильных колебаний.

Полученные моделирования подтверждают, что полностью исключить крутильные осцилляции при бурении неоднородных пород практически невозможно. Частота и амплитуда колебаний определяются контрастом прочности между

соседними интервалами. Так, переход от глинистых сланцев (~20 МПа) к песчаникам (~50-80 МПа) вызывает самовозбуждение крутильных колебаний частотой порядка 1-2 Гц с относительным снижением угловой скорости до 80 %. В полевых условиях такие режимы проявляются в виде рывков ротора и колебаний давления на стояке.

Неоднородность породы также приводит к локальным изменениям траектории разрушения. В мягких прослойках наблюдается эффект «дрожащего резания», когда резец недогружается и не достигает проектной глубины резания. В твёрдых включениях возможны кратковременные остановки долота, сопровождаемые последующим рывком, что создаёт ударные нагрузки. Оба механизма оказывают неблагоприятное влияние на ресурс инструмента и снижают механическую скорость проходки.

Поликристаллические алмазные резцы изнашиваются вследствие совокупности абразивного воздействия, ударных нагрузок и теплового разрушения. В однородных породах преобладает абразивный механизм: формируется гладкая фаска износа. В неоднородных разрезах к нему добавляются динамические воздействия.

Вибрации (особенно боковые и крутильные) приводят к многократным микроударным контактам резца с породой и стенками скважины. Подобные нагрузки вызывают скалывание алмазного слоя и растрескивание подложки, что соответствует хрупкому механизму разрушения. Отмечены случаи, когда после непродолжительной работы в чередующихся пластах часть резцов демонстрировала равномерный абразивный износ, тогда как другие имели выбоины и выломы, характерные для ударного разрушения.

Режимы проскальзывания сопровождаются трением без эффективного резания, что приводит к локальному нагреву режущей грани и тепловому выкрашиванию. Высокочастотные крутильные колебания усиливают данный механизм: при чередовании остановок и резкого вращения концентрируются ударные и тепловые нагрузки, вызывая термомеханическую усталость материала резцов.

Типичные формы повреждений зависят от доминирующего вибрационного режима. Осевые удары вызывают выбоины на передних гранях; боковое биение приводит к износу и разрушению калибрующих резцов; крутильная неустойчивость сопровождается локальными трещинами и термомеханическим разрушением. Таким образом, анализ формы износа позволяет диагностировать преобладающий режим колебаний и условия работы инструмента.

Вибрационные процессы существенно уменьшают энергетическую эффективность разрушения породы. Результаты расчётов подтверждают данные о росте удельной энергии резания и снижении средней механической скорости проходки до 20-50 % при развитых крутильных колебаниях. Полевые наблюдения показывают, что интервалы с повышенными вибрациями характеризуются ускоренным затуплением долот и сокращением проходки на одно долото.

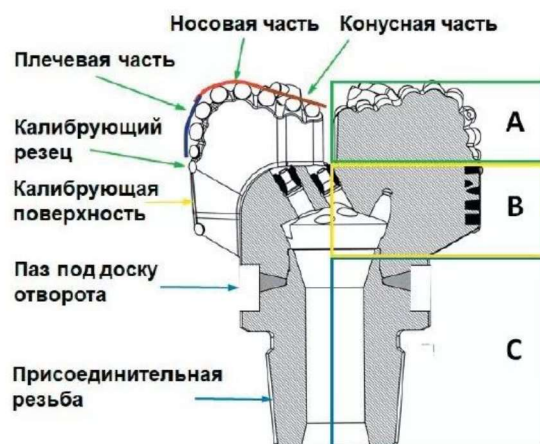


Рис.2. Основные конструктивные элементы PDC-долота и функциональные зоны A-C.

Высокочастотные вращательные колебания снижают ресурс бурильных труб, вызывают усталостные разрушения и могут приводить к раскручиванию резьбовых соединений. Анализ зон риска в координатах WOB-RPM позволяет выделить неблагоприятные области, в которых повышена вероятность возникновения осевых, боковых или крутильных вибраций. Высокая осевая нагрузка при низких оборотах способствует развитию крутильной неустойчивости; высокая скорость вращения при недостаточной нагрузке - боковым биением; слишком малый WOB - подпрыгиванию долота.

Использование адаптивных систем управления параметрами бурения (например, инструментов стабилизации вращения и алгоритмов автоматического регулирования) позволяет удерживать работу долота в оптимальном диапазоне. Моделирование и данные полевых испытаний показывают, что применение адаптивного регулирования уменьшает амплитуду крутильных колебаний в 2-3 раза и увеличивает механическую скорость проходки на 30-60 %.

Геометрия PDC-долота определяет его устойчивость к вибрациям и эффективность разрушения породы. На рисунке 2 показано, что долото состоит из трёх функциональных зон - рабочей (A), стабилизирующей (B) и силовой (C).

Носовая и конусная часть формируют основное резание, калибрующая зона задаёт направление ствола и уменьшает боковые биения, а нижняя часть отвечает за передачу нагрузки и крутящего момента. Конфигурация лопастей, расположение резцов и гидравлических насадок определяют распределение нагрузки и характер взаимодействия долота с породой.

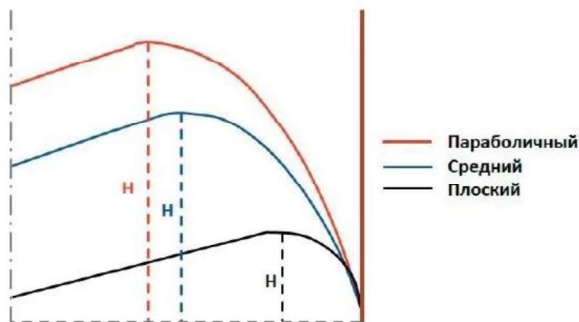


Рис.3. Типы профиля рабочей поверхности PDC-долота: плоский, средний и параболический.

Профиль рабочей поверхности также влияет на динамику бурения. На рисунке 3 показаны три распространенных варианта – плоский, средний и параболический. Плоский обеспечивает стабильность в мягких породах, средний подходит для перемежающихся пластов, а параболический показывает наибольшую эффективность в твердых породах, обеспечивая более глубокое врезание при меньших колебаниях нагрузки. Выбор профиля определяет устойчивость долота к продольным, крутильным и поперечным вибрациям и должен учитывать изменчивость свойств разреза.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода при анализе работы PDC-долот в неоднородных породах. Ни одна модель по отдельности не даёт полной картины, а объединение механико-математических, энергетических и эмпирических методов позволяет сформировать практические рекомендации.

Во-первых, подтверждено ключевое влияние вибраций на ресурс долота. Особенно опасны крутильные колебания с периодическими остановками и рывками, которые вызывают резкий рост нагрузки, снижают скорость проходки и ускоряют износ режущих элементов. Рост удельной энергии разрушения при отсутствии увеличения скорости проходки является надёжным признаком начала неустойчивого режима. Мониторинг осевых и крутильных ускорений, крутящего момента и удельной энергии в реальном времени позволяет своевременно

распознавать такие состояния и корректировать режим работы.

Во-вторых, выявлено, что различные типы моделей выполняют разные функции. Механико-математические расчёты подробно объясняют происхождение автоколебаний, но требуют значительных вычислительных ресурсов. Энергетические подходы удобны тем, что дают простые и оперативные критерии оценки эффективности бурения. Эмпирические и нейросетевые методы обеспечивают быстрое обнаружение опасных тенденций, но нуждаются в корректировке на основе физических закономерностей. Наиболее эффективной представляется комбинированная схема, где эмпирические алгоритмы работают в связке с физическими ограничениями.

В-третьих, конструкция и материалы долота существенно влияют на его устойчивость. В неоднородных разрезах конструктивные решения, повышающие ударную вязкость резцов и устойчивость корпуса, позволяют снизить вероятность сколов и растрескивания. Применение гибридных долот и долот с различными типоразмерами резцов помогает сглаживать перепады твёрдости пород и уменьшать вибрационные нагрузки. Подбор долота должен учитывать степень неоднородности разреза и ожидаемый характер колебаний.

В-четвёртых, меры по снижению вибраций включают оптимизацию сочетаний осевой нагрузки и скорости вращения, применение амортизаторов и устройств против заклинивания, установку стабилизаторов для уменьшения изгибных колебаний и корректный выбор гидравлической компоновки. Поддержание параметров в допустимом диапазоне, определяемом по режимным картам, обеспечивает максимальную скорость проходки при минимальном уровне колебаний.

Несмотря на ряд ограничений, связанных с обзорным характером работы и зависимостью от литературных данных, выявленные закономерности остаются универсальными. Перспективным направлением является развитие моделей, способных прогнозировать возникновение автоколебаний в режиме реального времени и автоматически подстраивать режим бурения под изменения свойств пород. Это позволит повысить ресурс долота, улучшить стабильность процесса и снизить аварийность.

Заключение

Проведённый анализ показал, что работа PDC-долот в неоднородных по прочности породах определяется сочетанием механических, энергетических и вибрационных процессов. Установлено, что перемежающиеся по твёрдости пласты неизбежно вызывают неустойчивые

режимы бурения, сопровождающиеся продольными, крутильными и поперечными колебаниями. Эти колебания приводят к росту удельной энергии разрушения, снижению механической скорости проходки и интенсивному износу режущих элементов.

Показано, что характер вибраций и износа тесно связан с конструкцией долота, профилем его рабочей поверхности и размещением резцов. Выявленные закономерности подтверждают необходимость подбора типа долота, геометрии режущей части и гидравлической схемы с учётом неоднородности разреза. Оптимизация режима бурения, применение амортизирующих и стабилизирующих устройств, а также контроль параметров в реальном времени позволяют

существенно уменьшить амплитуду колебаний и продлить ресурс долота.

Исследование подтвердило, что комбинация механико-математических, энергетических и эмпирических моделей обеспечивает наиболее полное описание процесса бурения и должна использоваться для проектирования компоновок, выбора инструмента и управления режимами. Дальнейшее развитие требуют методы прогноза вибраций и износа в реальном времени, основанные на объединении физических принципов и данных многопараметрового мониторинга. Их внедрение позволит повысить устойчивость процесса и эффективность бурения в сложнопереслащённых разрезах.

NOTEKIS QATLAMLARDA PDC-DOLOTALAR ISHLASH MEXANIKASINI YEYILISH JARAYONLARI VA VIBRATSION TA'SIRLARNI HISOBGA OLGAN HOLDA TADQIQ ETISH

Toshov J.B., Erkinov D.I., Yunusov J.F.

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston.

ANNOTATSIYA Maqolada mustahkamligi va tuzilishi bo'yicha notekis bo'lgan qatlamlarda PDC-dolotalarning ishlashiga xos bo'lgan mexanik va dinamik jarayonlar tahlil qilinadi. Ayniqsa, tebranish rejimlarining tog' jinsini barqaror ezish jarayoniga, burg'ilashning energiya samaradorligiga hamda kesuvchi elementlar yeyilish tezligiga ta'siri alohida o'rganiladi. Shuningdek, yumshoq va qattiq qatlamlar o'rtasidagi o'tish zonalarida yuzaga keladigan bo'ylama, burilish (krujilma) va yonlama tebranishlarning kelib chiqish mexanizmlari hamda ularning o'zaro kuchayishi tahlil qilingan. Maqolada dolota va tog' jinsi o'zaro ta'sirini tavsiflovchi mexanik-matematik, energetik va empirik modellarning taqqoslovchi sharhi beriladi. Bu doirada o'qi yuklanishi va aylanish tezligiga bog'liq ravishda o'tish tezligining o'zgarish qonuniyatlari, tog' jinsini buzish uchun zarur bo'lgan maxsus mexanik energiya mezonlari, shuningdek, burg'ilashning beqaror rejimlarini aniqlash usullari ko'rib chiqiladi. Tadqiqot natijalari tebranishlarning energiya sarfini oshirishi, kesish jarayonining bir maromda borishini buzishi va kesuvchi elementlarning yemirilishini kuchaytirishini ko'rsatadi. Bunga qirindilarni uchirib yuborish, termomexanik shikastlanish va charchoqdan hosil bo'ladigan yorilishlar kiradi.

KALIT SO'ZLAR PDC-dolota, notekis qatlamlar, tebranishlar, uzilib-aylanish rejimi, kesuvchi element yeyilishi, o'tish tezligi, mexanik va energetik burg'ilash modellari.

INVESTIGATION OF THE OPERATING MECHANICS OF PDC DRILL BITS IN HETEROGENEOUS ROCK FORMATIONS WITH CONSIDERATION OF WEAR MECHANISMS AND VIBRATION EFFECTS

Toshov J.B., Erkinov D.I., Yunusov J.F.

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

ABSTRACT The article examines the mechanical and dynamic features of PDC bit performance when drilling formations heterogeneous in strength and structure, with particular emphasis on the influence of vibration regimes on rock destruction stability, energy efficiency of the drilling process, and cutter wear rate. Special attention is given to the analysis of mechanisms responsible for axial, torsional, and lateral vibrations, as well as their mutual amplification when transitioning between soft and hard layers. A comparative review of mechanical-

mathematical, energy-based, and empirical models describing bit–rock interaction is provided, including dependencies of penetration rate on axial load and rotational speed, criteria of specific mechanical energy of rock destruction, and methods for diagnosing unstable drilling regimes. It is demonstrated that vibrations increase energy consumption, disrupt uniform cutting, and accelerate cutter degradation through chipping, thermomechanical damage, and fatigue failure. Based on model analysis and experimental observations, engineering solutions are proposed to reduce vibrations, improve bit stability, and optimize drilling performance in complex, interbedded formations.

KEYWORDS

PDC bit, heterogeneous formations, vibrations, intermittent rotation, cutter wear, rate of penetration, mechanical and energy-based drilling models.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маурер, В.К. Механика разрушения горных пород при бурении / В.К. Маурер. - М.: Недра, 1965. - 210 с.
2. Петров, А.Н. Математическое моделирование взаимодействия буровой колонны и долота с породой / А.Н. Петров, С.В. Гаврилюк // Вестник технических наук. - 2020. - № 4. - С. 112-119.
3. Сидоров, М.А. Влияние неравномерности вращения долота на динамику бурения / М.А. Сидоров, И.Л. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 6. - С. 95-100.
4. Барков, А.В. Геомеханическое моделирование устойчивости ствола скважины в трещиноватых породах / А.В. Барков // Инженерный журнал. - 2019. - № 3. - С. 78-84.
5. Teale, R. The concept of specific energy in rock drilling / R. Teale // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 1965. - Vol. 2, No. 1. - P. 57-73.
6. Bourgoyne, A.T. Applied Drilling Engineering / A.T. Bourgoyne, F.S. Young. - Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1986. - 502 p.
7. Павлов, А.А. Энергетические модели бурения и прогноз износа долота / А.А. Павлов, С.Н. Григорьев // Бурение и нефть. - 2022. - № 10. - С. 31-35.
8. Ахмедов, Т.Ш. Прогноз разломов по 3D-сейсмике и ГИС при бурении / Т.Ш. Ахмедов, К.Н. Ибрагимов // Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2020. - № 2. - С. 60-65.
9. Ильмендеева, О.И. Оперативный контроль геологических границ с использованием LWD / О.И. Ильмендеева, В.А. Носов // Бурение и нефть. - 2021. - № 5. - С. 40-44.
10. Киселёв, А.С. Применение нейросетей для предсказания осложнений при бурении / А.С. Киселёв, С.В. Нечаев // Интеллектуальные технологии в геологии. - 2024. - № 1. - С. 23-29.
11. Гуринов, Е.Г. Гибридные модели прогноза аварий в сложных геологических условиях / Е.Г. Гуринов, Н.Ю. Ключников // Геоинформатика. - 2023. - № 6. - С. 70-75.
12. Halliburton. LOGIX Real-Time Optimization System [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.halliburton.com/>, свободный. - Дата обращения: 01.12.2025.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Toshov Javokhir Buriyevich	— DSc, Professor at Tashkent State Technical University named after I. Karimov, 100095, Uzbekistan, Tashkent, Almazar district, University str. 2, E-mail: j.toshov@yandex.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4278-1557
Erkinov Dilshodbek Ilhomovich	— PhD Student, Tashkent State Technical University named after I. Karimov, 100095, Uzbekistan, Tashkent, Almazar district, University str. 2. E-mail: dilshodbek.ilhomovich@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-5970-416X
Yunusov Jasurbek Farxod o'g'li	— Assistant of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University named after I. Karimov, 100095, Uzbekistan, Tashkent, Almazar district, University str. 2. E-mail: jasurbekyunusov@tdtu.uz ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-5126-0059