УДК 622.24.051.64
ГРНТИ 52.47.15
DOI 10.56525/PTNE3557

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ PDC-ДОЛОТА С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ РЕЗЦОВ И УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

***Калжанова А.Б., Сарбопеева М. Д., Сундетова П.С.**
Университет Есенова, г. Актау, Казахстан
e-mail: a7ok_86@mail.ru, manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz,
perizatsisembaevna@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены особенности взаимодействия поликристаллических алмазных резцов PDC с горной породой на забое скважины. Несмотря на хорошие режущие свойства, ресурс таких материалов при бурении прочных пород часто оказывается недостаточным. Наиболее распространенными являются лопастные долота, оснащенные композиционными алмазосодержащими материалами (КАМ) На основе исходного материала систематизированы геометрические и технологические факторы, определяющие глубину внедрения резца и ожидаемую механическую скорость бурения. Основное внимание уделено конструкции долота ЭД PDC-161 с парным вооружением «резец PDC – сверхтвердый цилиндрический элемент», распределению осевой нагрузки между резцами и влиянию твердости пород. Показано, что учет круглой формы рабочей части резца, отрицательного переднего угла и площади контактного сегмента позволяет повысить обоснованность расчетов режима бурения. Для расчетного примера при осевой нагрузке 80 кН, частоте вращения 1,5 об/с, четырех резцах на одном радиусе и твердости породы по А. А. Шрейнеру 3 кН/мм получена глубина внедрения около 1,185 мм и расчетная скорость 25,5 м/ч. Предложенный подход предназначен для инженерного прогнозирования работы PDC-долот в различных геолого-технических условиях.

Ключевые слова: PDC-долото; PDC-резец; разрушение горных пород; механическая скорость бурения; осевая нагрузка; твердость породы; забой скважины.

Введение

Эффективность строительства скважин во многом определяется соответствием породоразрушающего инструмента физико-механическим свойствам разбуриваемого массива и рациональностью режима бурения. PDC-долота относятся к инструментам режуще-скалывающего действия и обеспечивают разрушение породы при сочетании осевой нагрузки и вращательного движения. Рабочий элемент PDC представляет собой твердосплавную основу с поликристаллическим алмазным слоем, благодаря чему достигаются высокая износостойкость режущей кромки и возможность работы при сравнительно умеренной осевой нагрузке [1-10].

В исходном материале отмечено, что расчет ожидаемой скорости бурения должен учитывать не только технологические параметры, но и геометрию единичного PDC-резца, его отрицательный передний угол и пространственное положение относительно забоя. Практическая задача заключается в определении такой глубины внедрения, которая соответствует нагрузке на резец и прочности породы и при этом не приводит к чрезмерной перегрузке вооружения. Это особенно важно при проходке неоднородных разрезов, где твердость и абразивность пород изменяются по глубине.

Материалы и методы исследования.

В качестве базовой конструкции рассмотрено долото ЭД PDC-161 диаметром 161 мм, предназначенное для бурения технологических скважин. Корпус долота соединяется с бурильной колонной резьбовым узлом и несет четыре лопасти. Вооружение каждой лопасти выполнено парой «резец PDC – сверхтвердый цилиндрический элемент». Режущая кромка

PDC-резца и торец твердосплавного элемента расположены в согласованной плоскости, а периферийная часть лопастей дополнительно оснащена сверхтвердыми вставками. В конструкции предусмотрены каналы и гидромониторные насадки для подачи промывочной жидкости. Такое исполнение направлено на предварительное ослабление массива и последующее эффективное срезание разрушенного материала резцом PDC [11-15].



Рисунок 1. 3D модель бурового долота ЭД PDC-220,7.

A – общий вид; B – вид снизу (вид на торец); C-C – разрез; D-D – разрез по отверстию для подачи промывочной жидкости.

Механизм работы парного вооружения основан на последовательном воздействии двух элементов. Сверхтвердая цилиндрическая вставка формирует в породе локальную зону трещиноватости и сниженной прочности, после чего лезвие PDC-резца удаляет ослабленный материал. В исходной работе указано, что в твердых породах формирование такой зоны способно существенно увеличить эффективную глубину воздействия алмазного вооружения. Рациональным является положение, при котором оба элемента совместно участвуют в разрушении: выступание вставки не должно приводить к выключению PDC-резца из работы, а чрезмерное выступание резца относительно вставки – к его перегрузке и поломке.

Расчетная модель внедрения PDC-резца

Для вращательного бурения начальная скорость углубления забоя может быть представлена зависимостью $V = h \cdot m \cdot n$, где h – углубление забоя за один оборот резцами, расположенными на одном радиусе вращения; m – число таких резцов; n – частота вращения инструмента. Ключевой расчетной величиной является h. Для PDC-резца ее нельзя определять по модели призматического резца без поправок, поскольку внедряемая часть круглой пластины образует сегмент, а сам резец устанавливается с отрицательным передним углом.

В расчетной схеме учитываются осевая нагрузка на единичный резец P_0, угол наклона передней грани β, коэффициент трения f, контактная прочность породы Нк, радиус алмазосодержащей пластины r, длина хорды C и площадь контактного сегмента. Контактная прочность в исходной методике связана с твердостью породы по А. А. Шрейнеру соотношением Нк = 0,62Рш. Таким образом, увеличение твердости породы при неизменной нагрузке уменьшает глубину внедрения и, следовательно, механическую скорость бурения.

Для инженерного применения площадь кругового сегмента предложено приближенно заменить площадью равнобедренного треугольника с той же высотой h и основанием, равным хорде C. В исходном исследовании указано, что при малых глубинах внедрения площадь такого треугольника примерно на 30 % меньше площади сегмента. Это приближение упрощает вычисления, однако требует итерационного согласования выбранной длины хорды C с получаемой глубиной h.

Влияние геолого-технических условий на работу PDC-долота

Твердость и абразивность пород являются основными геологическими факторами, непосредственно влияющими на нагружение PDC-резцов. При переходе к более твердым породам уменьшается глубина внедрения единичного резца, возрастает удельная нагрузка на режущую кромку и повышается чувствительность инструмента к ошибкам выбора осевой нагрузки. В более мягких породах глубина внедрения возрастает, однако режим должен ограничиваться условиями очистки забоя и допустимой нагрузкой на вооружение. Поэтому параметры PDC-долота целесообразно назначать не изолированно, а совместно с данными геолого-технического наряда.

Существенную роль играет промывка. Недостаточный расход бурового раствора вызывает накопление шлама и ухудшает контакт резцов с породой, тогда как чрезмерная осевая нагрузка может привести к перегрузке и прижогу долота. При вводе нового долота в работу рационально начинать с уменьшенной осевой нагрузки и увеличивать ее после формирования устойчивой зоны разрушения. Эти положения согласуются с исходным описанием технологии эксплуатации экспериментального PDC-инструмента.

Расчетный пример и обсуждение результатов

Для иллюстрации методики в исходной работе рассмотрены следующие параметры: осевая нагрузка на долото $Pg = 80$ кН; общее число резцов на торце $m_0 = 30$; число резцов на одном радиусе $m = 4$; частота вращения $n = 1{,}5$ об/с; угол наклона передней грани $\beta = 15°$; твердость породы по А. А. Шрейнеру $Pш = 3$ кН/мм; коэффициент трения $f = 0{,}3$. Нагрузка на единичный резец составляет $P_0 = Pg/m_0 = 2{,}67$ кН. При уточнении длины хорды до $C = 7$ мм расчетная глубина внедрения принята равной $h \approx 1{,}185$ мм. По зависимости $V = h \cdot m \cdot n$ получено расчетное значение механической скорости около 25,5 м/ч.

Приведенный пример показывает чувствительность прогнозной скорости к глубине внедрения единичного резца. Следовательно, для практического применения модели необходимо корректно задавать твердость разбуриваемой породы, фактическую нагрузку, приходящуюся на резец, число активно работающих резцов и частоту вращения. В неоднородном геологическом разрезе расчет должен выполняться по отдельным интервалам с учетом изменения свойств пород. Это позволяет использовать модель не только для оценки скорости, но и для выбора более щадящего режима при входе в твердые и абразивные прослои.

Результаты исследования

Для повышения эффективности PDC-долота рекомендуется: согласовывать осевую нагрузку и частоту вращения с твердостью пород; при начальной приработке долота применять пониженную осевую нагрузку; контролировать расход промывочной жидкости для устойчивого удаления шлама; при расчете скорости учитывать круглую геометрию PDC-резца и отрицательный передний угол; для парного вооружения обеспечивать согласованное положение режущей кромки PDC и сверхтвердой вставки. Использование этих положений позволяет снизить вероятность перегрузки резцов и повысить достоверность прогнозирования механической скорости.

Заключение

1. Геометрия круглого PDC-резца и его пространственная ориентация являются существенными факторами, определяющими глубину внедрения в породу и ожидаемую скорость углубления забоя.

2. Парное вооружение «PDC-резец – сверхтвердый цилиндрический элемент» обеспечивает последовательное ослабление и удаление породы; рациональная совместная работа элементов требует согласования их положения относительно забоя.

3. Приближенная замена площади контактного сегмента площадью равнобедренного треугольника упрощает инженерный расчет глубины внедрения, но требует итерационного согласования длины хорды и высоты сегмента.

4. Расчетный пример исходного исследования при Pg = 80 кН и n = 1,5 об/с дает h ≈ 1,185 мм и V ≈ 25,5 м/ч; эти значения относятся к заданному набору параметров и не должны переноситься на другие геологические условия без перерасчета.

5. Практическое применение методики позволяет увязать конструктивные параметры PDC-долота с твердостью пород и режимом бурения, что создает основу для прогнозирования механической скорости и снижения износа вооружения.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фёдоров, Б.В. Разрушение горных пород и теоретические основы процесса бурения скважин, Алматы, 2021.

2. Aziukovskyi, O.O., Koroviaka, Ye.A., Ihnatov, A.O. Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions: monograph. Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro: Zhurfond, 2023. – 159 p.

3. Ihnatov, A., Koroviaka, Y., Rastsvietaiev, V., Tokar, L. (2021). Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020, E3S Web of Conferences 230, 01016 (2021). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001016

4. Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Муратова С.К., Сарбопеева М.Д., Калжанова А.Б., Жангирханова А.А. Подготовка смесей CrB_2 и формирование брикетов для композитов буровых долот // Нефть и Газ. – 2024. – № 3 (141). – С. 35–44. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.02

5. Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., Sarbopeyeva, M., Kamyshatskyi, O., & Petrenko, V. (2026). Approach to Optimizing Energy Consumption in Rock Destruction through Advanced Design Parameters of Cutting Elements. Advances in Science and Technology, 172, 77-86.

6. Ратов Б.Т., Федоров Б.В., Куттыбаев А.Е., Койбакова С.Е., Бораш А.Р. Научные основы создания алмазных буровых инструментов кольцевого типа // Нефть и Газ. – 2022. – № 4 (130). – С. 58–73. – ISSN 1562-2932; 2708-0080. – Алматы. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-4.04

7. Pashchenko, O., Sarbopeyeva, M., Kamyshatskyi, O., Arshidinova, M., & Petrenko, V. (2026). Comparative Analysis of Contact Stress Models for Optimizing Rock-Destroying Elements in Drilling Operations. Advances in Science and Technology, 172, 87-96

8. Ратов Б.Т., Федоров Б.В., Надиров К.С., Коргасбеков Д.Р., Байбоз А.Р. Совершенствование технологии и техники бурения резцовыми инструментами // Нефть и Газ. – 2019. – № 3 (111). – С. 67–75. – ISSN 1562-2932. – Алматы.

9. Biletskiy, M. T., Ratov, B. T., Kozhevnykov, A. A., Baiboz, A. R., & Delikesheva D. N. (2018). Updating the theoretic model of rock destruction in the course of drilling. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2(428), 63 – 71. ISSN 2224-5278

10. Chudyk, I., Biletskiy, M., Ratov, B., Sudakov, A., & Borash, A. (2024). A new method of oil and water well completion involving the implosion effect. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348(1), 012056. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012056

11. Khomenko, V., Ratov, B., Koroviaka, Y., Sarbopeyeva, M., & Makyzhanova, A. (2026, May). Kinematic analysis and performance optimization of PDC drill bits with rolling cutters. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1630, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

12. Sudakov, A., Sarbopeyeva, M., Isakova, M., Narbayev, M., Aliakbar, M., & Shumov, A. (2026). Results of Research into the Physical and Mechanical Properties of Biopolymer Gravel Composite Block Filters for Hydrogeological Wells. Advances in Science and Technology, 172, 226-237.

13. Umirova, G., Kuttybayev, A., Khomenko, V., Muratova, S., Biletskiy, M., Ratov, B., ... & Zhang, L. (2025). Advanced approaches to depth optimization in large-diameter water well drilling in mangystau peninsula. Engineered Science, 36, 1605.

14. Ратов Б.Т., Федоров Б.В., Куттыбаев А.Е., Руслякова И.А., Утепов З.Г., Әлиакбар М.М., Сундетова П.С. Обоснование параметров алмазной буровой коронки для минерализованных твердых горных пород // Нефть и Газ. – 2026. – № 4 (154). – С. 61–73. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-4.04

15. Сейдалиев А.А., Калжанова А.Б., Гусманова А.Г., Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Сарбопеева М.Д., Утепов З.Г. Оптимизация эксплуатационных свойств бурового инструмента с алмазосодержащими элементами // Нефть и Газ. – 2025. – № 2 (146). – С. 42–52. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03

REFERENCE

1. Fyodorov, B.V. Razrushenie gornyh porod i teoreticheskie osnovy processa bureniya skvazhin, Almaty, 2021.

2. Aziukovskyi, O.O., Koroviaka, Ye.A., Ihnatov, A.O. Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions: monograph. Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro: Zhurfond, 2023. – 159 p.

3. Ihnatov, A., Koroviaka, Y., Rastsvietaiev, V., Tokar, L. (2021). Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020, E3S Web of Conferences 230, 01016 (2021). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001016

4. Ratov B.T., Kuttybayev A.Ye., Muratova S.K., Sarbopeyeva M.D., Kalzhanova A.B., Zhangirkhanova A.A. Podgotovka smesey CrB_2 i formirovaniye briketov dlya kompozitov burovykh dolot // Neft' i Gaz. – 2024. – № 3 (141). – S. 35–44. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.02

5. Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., Sarbopeyeva, M., Kamyshatskyi, O., & Petrenko, V. (2026). Approach to Optimizing Energy Consumption in Rock Destruction through Advanced Design Parameters of Cutting Elements. Advances in Science and Technology, 172, 77-86.

6. Ratov B.T., Fedorov B.V., Kuttybaev A.E., Kojbakova S.E., Boraš A.R. Naučnye osnovy sozdaniâ almaznyh burovyh instrumentov kol′cevogo tipa // Neft′ i Gaz. – 2022. – № 4 (130). – S. 58–73. – ISSN 1562-2932; 2708-0080. – Almaty. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-4.04

7. Pashchenko, O., Sarbopeyeva, M., Kamyshatskyi, O., Arshidinova, M., & Petrenko, V. (2026). Comparative Analysis of Contact Stress Models for Optimizing Rock-Destroying Elements in Drilling Operations. Advances in Science and Technology, 172, 87-96

8. Ratov B.T., Fedorov B.V., Nadirov K.S., Korgasbekov D.R., Bayboz A.R. Sovershenstvovaniye tekhnologii i tekhniki bureniya reztsovymi instrumentami // Neft' i Gaz. – 2019. – № 3 (111). – S. 67–75. – ISSN 1562-2932. – Almaty.

9. Biletskiy, M. T., Ratov, B. T., Kozhevnykov, A. A., Baiboz, A. R., & Delikesheva D. N. (2018). Updating the theoretic model of rock destruction in the course of drilling. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2(428), 63 – 71. ISSN 2224-5278

10. Chudyk, I., Biletskiy, M., Ratov, B., Sudakov, A., & Borash, A. (2024). A new method of oil and water well completion involving the implosion effect. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348(1), 012056. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012056

11. Khomenko, V., Ratov, B., Koroviaka, Y., Sarbopeyeva, M., & Makyzhanova, A. (2026, May). Kinematic analysis and performance optimization of PDC drill bits with rolling cutters. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1630, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

12. Sudakov, A., Sarbopeyeva, M., Isakova, M., Narbayev, M., Aliakbar, M., & Shumov, A. (2026). Results of Research into the Physical and Mechanical Properties of Biopolymer Gravel Composite Block Filters for Hydrogeological Wells. Advances in Science and Technology, 172, 226-237.

13. Umirova, G., Kuttybayev, A., Khomenko, V., Muratova, S., Biletskiy, M., Ratov, B., ... & Zhang, L. (2025). Advanced approaches to depth optimization in large-diameter water well drilling in mangystau peninsula. Engineered Science, 36, 1605.

14. Ratov B.T., Fedorov B.V., Kuttybaev A.E., Ruslyakova I.A., Utepov Z.G., Әliakbar M.M., Sundetova P.S. Obosnovanie parametrov almaznoj burovoj koronki dlya mineralizovannyh tverdyh gornyh porod // Neft' i Gaz. – 2026. – № 4 (154). – S. 61–73. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-4.04

15. Sejdaliev A.A., Kalzhanova A.B., Gusmanova A.G., Ratov B.T., Kuttybaev A.E., Sarbopeeva M.D., Utepov Z.G. Optimizaciya ekspluatacionnyh svojstv burovogo instrumenta s almazosoderzhashchimi elementami // Neft' i Gaz. – 2025. – № 2 (146). – S. 42–52. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03

КЕСКІШТЕРДІҢ ГЕОМЕТРИЯСЫН ЖӘНЕ ТАУ ЖЫНЫСТАРЫНЫҢ БҰЗЫЛУ ШАРТТАРЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, PDC ҚАШАУЫНЫҢ ЖҰМЫС ПАРАМЕТРЛЕРІН НЕГІЗДЕУ

***А.Б. Калжанова, М. Д. Сарбопеева, П.С. Сундетова**
Есенов Университеті, Ақтау қ., Қазақстан
e-mail: a7ok_86@mail.ru, manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz,
perizatsisembaevna@gmail.com

Аңдатпа. PDC поликристалды алмас кескіштердің ұңғымадағы тау жыныстарымен өзара әрекеттесу ерекшеліктері қарастырылады. Жақсы кесу қасиеттеріне қарамастан, берік жыныстарды бұрғылау кезінде мұндай материалдардың ресурсы жиі жеткіліксіз болып шығады. Ең көп тарағандары-құрамында Алмаз бар композициялық материалдармен (КАМ) жабдықталған қалақша қашаулары. Бастапқы материал негізінде кескішті енгізу тереңдігін және бұрғылаудың күтілетін механикалық жылдамдығын анықтайтын геометриялық және технологиялық факторлар жүйеленген. "PDC кескіш-өте қатты цилиндрлік элемент" жұптастырылған қару – жарақпен ЭД PDC-161 қашауының дизайнына, кескіштер арасындағы осьтік жүктеменің таралуына және тау жыныстарының қаттылығының әсеріне назар аударылады. Кескіштің жұмыс бөлігінің дөңгелек пішінін, теріс алдыңғы бұрышын және байланыс сегментінің ауданын есепке алу бұрғылау режимінің есептеулерінің негізділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Есептік мысал үшін 80 кН осьтік жүктеме, 1,5 айн/с айналу жиілігі, бір радиустағы төрт кескіш және А. А. Шрейнер бойынша тау жыныстарының қаттылығы 3 кН/мм, енгізу тереңдігі шамамен 1,185 мм және есептік жылдамдық 25,5 м/сағ. ұсынылған тәсіл әртүрлі геологиялық-техникалық жағдайларда жүйелердегі PDC қашауларының жұмысын инженерлік болжауға арналған.

Түйін сөздер: PDC-қашау; PDC-кескіш; тау жыныстарының бұзылуы; механикалық бұрғылау жылдамдығы; осьтік жүктеме; тау жыныстарының қаттылығы; ұңғыманың ұңғымасы.

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE PDC CHISEL OPERATION, TAKING INTO ACCOUNT THE GEOMETRY OF THE CUTTERS AND THE CONDITIONS OF ROCK DESTRUCTION

***Kalzhanova A., Sarbopeeva M., Sundetova P.**
Yessenov University, Aktau, Kazakhstan
e-mail: a7ok_86@mail.ru, manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz,
perizatsisembaevna@gmail.com

Abstract. The features of the interaction of polycrystalline PDC diamond cutters with rock at the bottom of the well are considered. Despite the good cutting properties, the resource of such materials is often insufficient when drilling hard rocks. The most common are blade bits equipped with composite diamond-containing materials (CAM). Based on the source material, geometric and technological factors that determine the depth of the cutter and the expected mechanical drilling speed are systematized. The main attention is paid to the design of the ED PDC-161 chisel with a pair of weapons "PDC cutter – superhard cylindrical element", the distribution of axial load between the cutters and the influence of rock hardness. It is shown that taking into account the round shape of the working part of the cutter, the negative front angle and the area of the contact segment makes it possible to increase the validity of drilling mode calculations. For a computational example with an axial load of 80 kN, a rotational speed of 1.5 rpm, four incisors at one radius, and a rock hardness of 3 kN/mm according to A. A. Schreiner, an embedding depth of about 1,185 mm and an estimated velocity of 25.5 m/h were obtained. The proposed approach is intended for engineering forecasting of the operation of PDC chisels in various geological and technical conditions.

Keywords: PDC chisel; PDC cutter; rock fracture; mechanical drilling speed; axial load; rock hardness; borehole.