

Проектирование режущих элементов долот с учетом кинематических и геометрических параметров

А.М. Буров, К.С. Кусакин, А.В. Шарикова, Д.О. Кривошук.

Волгоградского государственного технического университета

Аннотация: В работе, на основании анализа научных данных, исследовано влияние кинематики и геометрии профиля долота, армированных алмазными режущими элементами, на процесс наклонно-направленного бурения и выделены технологические проблемы, влияющие на его эффективность. Разработаны оптимальные конфигурации для режущих элементов. Установлены геометрические параметры переднего угла- β и угла резания- δ , обеспечивающие разрушение породы с наименьшим усилием. Предложен искусственный сверхтвердый материал с повышенными свойствами – кубический нитрид бора (кубонит-КТ) для оснащения торцевой поверхности. Выполнено обоснование рационального месторасположения режущих элементов на боковых и рабочих поверхностях долота. Ожидаемый результат - повышение механической скорости проходки и продление срока службы инструмента.

Ключевые слова: наклонно-направленное бурение, долото, осевая нагрузка, режущие элементы, сверхтвердый материал, угол резания, передний угол, скалывание, дробление.

Введение

Повышение эффективности наклонно-направленного бурения в значительной мере зависит от конструкции буровых долот и свойства материала режущей кромки, способных обеспечить высокую механическую скорость проходки и продлить срок службы инструмента. Бурение наклонных и горизонтальных стволов скважин ведется с применением забойных двигателей, что определяет повышенные скорости вращения инструмента. Для способа бурения с повышенными скоростями получили применение долота истирающе-режущего действия армированные резцами PDC, разрушающие породу алмазными или твердосплавными режущими элементами [1-3].

Бурение алмазным и твердосплавным инструментом твердых грунтов, сталкивается с рядом проблем. Главная проблема твердосплавного инструмента – низкая стойкость инструмента при повышенных скоростях вращения, а при снижении скорости вращения снижается скорость проходки.

К основным недостаткам алмазного бурения можно отнести высокую стоимость инструмента, повышенную чувствительность к динамическим нагрузкам, неравномерность параметров режима бурения и как следствие неравномерный износ алмазного слоя и преждевременный выход из строя инструмента. Усовершенствование конструкции режущих элементов лопастных долот PDC, оснащенных искусственным сверхтвердым материалом (ИСМ), способствующих повышению эффективности наклонно-направленного бурения, является актуальной задачей.

Цель работы: на основании анализа данных, научных исследований, разработать рациональные конфигурации режущих элементов с учетом их месторасположения на поверхности долота.

Влияние кинематических и геометрических параметров долота на динамику процесса.

При вращательном способе бурения, разрушение забоя скважины происходит за счет осевой нагрузки, передаваемой рабочим элементам долота, и крутящего момента [3-6]. В отличие от сверления твердой породы сверлом, в схеме резания долотом отсутствует сплошная режущая кромка, а в результате одновременного действия двух рабочих движений (окружного и подачи) каждая точка режущей кромки долота перемещается по винтовой траектории со скоростью результирующего движения. Угол наклона кинематической плоскости резания определяется как, $\eta = \arctg \frac{V_s}{V_o}$, где V_o - окружная скорость резания долота и для алмазных режцовых вставок составляет 0.8...3.5 м/с, а V_s -осевая скорость подачи для твердых грунтов составляет не более 3,5 м/ч [3]. Расчет показывает, что угол наклона кинематической плоскости резания- η составляет не более 0,1 градуса, что

близко к нулю и приближенно можно считать, что процесс резания проходит в плоскости перпендикулярной оси бурения.

Современные конструкции лопастных долот имеют сложный профиль и состоят из образующих поверхностей- С, N, Т, S, G (см.рис.1). Резцы в лопастях долота располагаются, как на боковой поверхности, так и на образующих поверхностях (рис.1). При этом окружная скорость вращения режущего элемента зависит от его местоположения и уменьшается- $V_{max} > V_3 > V_2 > V_1$, по мере приближения к оси вращения долота, а угол скорости резания- η стремится к 90° .

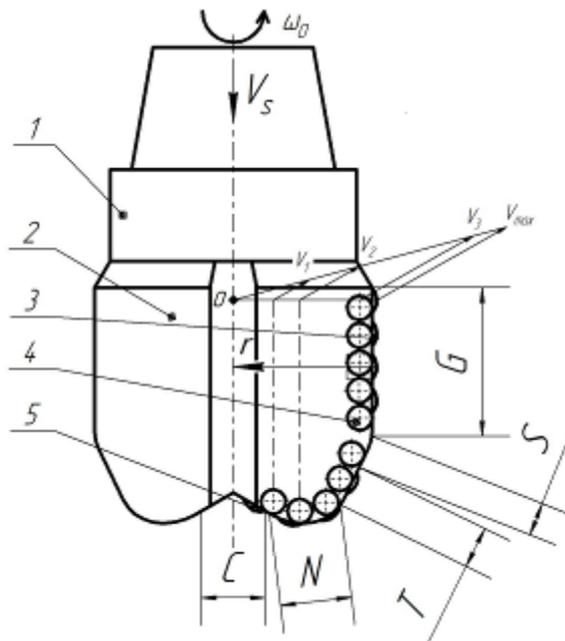


Рис.1.- Кинематика и характерные поверхности долот со вставками из искусственных сверхтвердых материалов (ИСМ): 1- корпус; 2-лопасть; 3-калибрующий резец; 4-скалывающий резец; 5-дробящий резец; С-внутренняя конусная поверхность; N-торцовая режущая поверхность; Т-наружная конусная поверхность; S- поверхность сопряжения; G- калибрующая поверхность; v_1, v_2, v_3, v_{max} - окружные скорости резания; r- радиус долота; ω - частота вращения; v_s -скорость подачи; ω_D -частота вращения долота.

Это означает, что динамика процесса разрушения забоя режущими элементами расположенными у оси изменяется, т.е. наступает явление, так называемого «зависания» долота. Разрушение центральной части забоя в такие моменты происходит за счет дробления породы, что снижает механическую скорость бурения [4].

Вторая особенность бурения заключается в том, что мгновенная угловая и осевая скорость долота колеблется около среднего значения с амплитудой и частотой, которые зависят от жесткости бурильного инструмента и свойств горной породы. Неравномерное вращение бурильного инструмента, имеющего большую массу, приводит к возникновению динамических нагрузок на алмазные режущие элементы и преждевременный выход их из строя. Если частота вынуждающих колебаний близка к собственной частоте вращательных колебаний инструмента, то могут наблюдаться резонансные явления, опасные как для режущих элементов, так и для бурильного инструмента [5-7].

Особенности процесса бурения позволили выделить следующие технологические проблемы, влияющие на работоспособность режущих элементов долота:

1. эффективность резания около оси долота снижается из-за снижения окружной скорости и крутящего момента, а в разрушение породы возрастает роль дробления;
 2. наблюдается снижение механической скорости проходки в результате накопления породы во внутренней конусной поверхности;
 - 3- неравномерность износа алмазных резцовых вставок из-за переменной окружной скорости точек профиля;
 - 4- наблюдается преждевременный выход из строя торцевых режущих алмазных резцов из-за чувствительности к ударным и вибрационным нагрузкам.
-

Технологические проблемы решаются разработкой оптимальных конфигурации и покрытий ИСМ режущих элементов, а также рациональным оснащением боковых и рабочих поверхностей -С, N, Т, С, G долота (см. на рис.1).

Обсуждение, принятые проектные решения

В работах [5-7] приведено выражение для расчета необходимого усилия резания- $F_{рез}$, учитывающее составляющие силы дробления и скалывания, а также величину переднего угла- β :

$$F_{рез} = \mu_c \cdot R_d \cdot F_{зат} + \frac{R_{ск} \cdot h \cdot B \cdot (\sin \delta + \mu_c \cdot \cos \delta)}{2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\varphi + \delta)}, \quad (1)$$

где $F_{зат}$ - площадка притупления, мм²; h - толщина срезаемого слоя породы; B - ширина режущего элемента, мм; δ - угол заострения; φ - угол скалывания; μ_c - коэффициент трения режущего элемента о породу; R_d - сопротивление дроблению, МПа; $R_{ск}$ - сопротивление скалыванию, МПа.

Передний угол - β геометрически связан с углом резания – δ , задним углом- α выражением: $\alpha + \delta + (-\beta) = 90^\circ$ (рис.2):

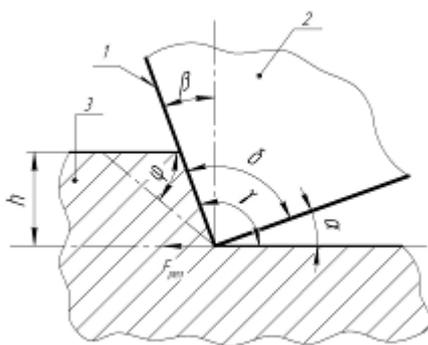


Рис.2. - Схема формирования сколов режущими элементами; δ - угол резания; β - передний угол; α - задний угол; γ - угол заострения; $F_{рез}$ -усилие резания; φ -угол скола

Для повышения эффективности бурения необходимо оптимизировать схему резания, с целью получения минимальной силы резания- $F_{рез}$. Это даст возможность увеличивать нагрузку на долото и как результат, увеличивается скорость проходки. Это достигается изменением параметров - R_d , B , δ в выражении (1) для силы резания следующим образом. Выделяем три зоны резания с неравноценными условиями бурения, которые требуют различного оснащения режущими вставками.

Разрушение породы начинается резцами на поверхности - N (рис.1) дроблением и скалыванием. В этой зоне, из-за низкой окружной скорости, целесообразно усилить эффект дробления путем снижения силы сопротивления. Для повышения эффекта дробления целесообразно применять резцы с конусной конфигурацией (рис.3.а) с углом резания при вершине $\delta=90^\circ$, которые обеспечивают оптимальную схему неравномерного сжатия и позволят разрушать грунт с наименьшим усилием [6,7].

В настоящее время, режущие вставки долот изготавливают из твердых сплавов и покрывают алмазосодержащим слоем, обладающим наибольшей абразивной способностью. Необходимо отметить, что торцовые резцы находятся под действием изгибающих напряжений и напряжений сжатия из-за скалывающих сил и осевой нагрузки. По данным работ [9-11] алмаз имеет предел прочности на изгиб в интервале 209...490 МПа и значительно уступает по этому показателю твердому сплаву. В настоящий момент существуют сверхтвердые синтетические материалы с большим пределом прочности на изгиб и сжатие. Таким материалом является модифицированный кубический нитрид бора (кубонит-КТ). Предел прочности у кубонита-КТ на изгиб составляет до 650 МПа, на сжатие, а прочность на сжатие монокристаллов кубонита-КТ зернистостью 125/100...250/200 выше нормативной прочности алмаза марки АС15 на 12...20 % [11,12]. Это дает возможность повысить долговечность торцовых

вставок путем замены алмаза на модифицированный кубический нитрид бора (кубонит-КТ).

Наружная конусная поверхность-Г долота (рис.1), это зона интенсивного резания с нарастающей окружной скоростью вращения точек профиля от оси к наружной поверхности. Для повышения эффективности резания, требуется увеличение площади контакта режущего клина с породой, за счет увеличения ширины режущего элемента. Это достигается плоской конструкцией режущего элемента 4 покрытым алмазосодержащим слоем 2 при установке в боковую поверхность 5 сектора долота (рис.3. б). Кроме этого необходимо создать схему объемного напряженного состояния, при которой порода становится пластически хрупкой, а срез режущими элементами происходит в направлении наименьшего сопротивления. Оптимальная схема напряженного состояния - неравномерное сжатие обеспечивается схемой резания с отрицательным передним углом – $\beta=15^{\circ}$. Схема резания с отрицательным передним углом β обеспечивает сдвиг грунта по плоскостям, в которых действуют максимальные касательные напряжения [5,6,7].

Резцы калибрующей поверхности-Г (рис.1) осуществляет чистовое резание с минимальным припуском, максимальными окружными скоростями и осевой скоростью подачи долота, а также являются демфером между долотом и стенкой скважины. Резцы этой зоны обеспечивают более точный диаметр скважины при бурении. Для противодействия истиранию и ударным нагрузкам целесообразно оснащать долота резцовыми вставками с увеличенным радиусом режущей кромки, а прилегающую боковую поверхность 5 оснащать плоскими резцами с отрицательным передним углом- $\beta=10^{\circ}$, который стабилизирует силу резания (рис. 3.б) [7].

Следует добавить - размещение режущих элементов предполагается в долоте от начала профиля - N и до конца-профиля-Г, а также на боковой поверхности лопасти. На профиле – С, размещение режущих элементов не

целесообразно из-за снижения эффективности резания породы и низкой стойкости алмазных вставок.

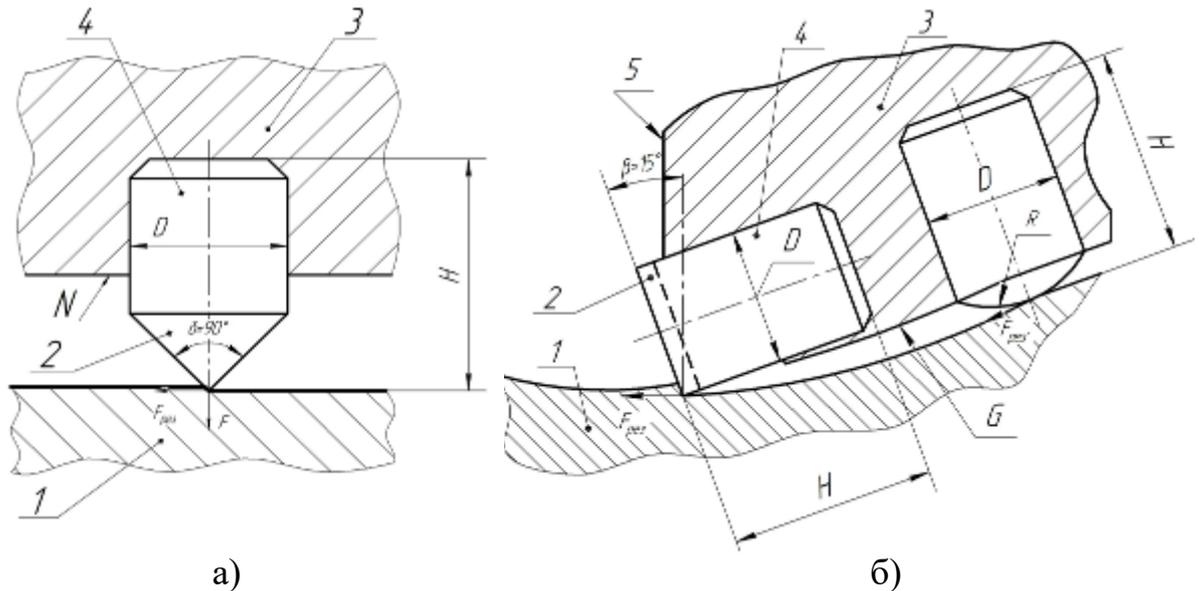


Рис.3. - Проектные профили режущих элементов и схема их установки в лопасти долота: а) - продольный разрез по оси долота; б) - поперечный разрез перпендикулярно оси долота; 1- грунт в скважине; 2-слой ИСМ; 3-лопасть; 4-стержни PDC; 5-боковая поверхность лопасти; δ -угол резания; β - передний угол; N- торцовая поверхность; G- калибрующая поверхность; D, H, R- геометрические размеры режущих элементов.

Заключение

Результатом исследования является разработка рациональных конфигураций режущих элементов, армированных вставками из ИСМ, и обоснование месторасположения на поверхности долота (табл.1)

Таблица 1.

Конфигурация и месторасположение режущих элементов на поверхности долота.

Оснащение долот РДС				
Окружная скорость	Наименование поверхности	Конфигурация режущего элемента	Покрытие	Примечание
0	С	отсутствует	-	мониторное отверстие
V_1	N	конусная	алмаз, кубонит	- зернистость 125/100...250/200
V_2	T	конусная	алмаз	$\delta = 90^0$
V_3	S	конусная	алмаз	$\delta = 90^0$
V_{max}	G	сферическая	алмаз	-
от V_1 до V_3	боковая	плоская	алмаз	$\beta = 15^0$ (отрицат.)
от V_3 до V_{max}	боковая	плоская	алмаз	$\beta = 10^0$ (отрицат.)

Вывод: Исследования показали - оснащение поверхности долота режущими элементами рациональной конфигурацией, дает возможность оптимизировать схему резания грунта в скважине, что позволит повысить механическую скорости проходки и продлить срок службы инструмента.

Литература

1. Федоров Б.В., Надиров К.С., Коргасбеков Д.Р., Байбоз А.Р., Ратов Б.Т. Совершенствование технологии и техники бурения режцовыми инструментами // Нефть и газ. 2019. №3. С. 67–75.

2. Кабдушев А.А., Коргасбеков Д.Р. Пути совершенствования конструкции буровых долот, вооруженных резцами PDC// Нефть и газ. 2022. №2. С. 81–91.

3. Абубакиров В.Ф., Буримов Ю.Г., Гноевых А.Н., Межлумов А.О., Близнюков В.Ю Буровое оборудование: Справочник. Том. 2: Буровой инструмент. - М: ОАО «Издательство «Недра», 2003. - 494 с.

4. Larsen-Bass J., Perrott C.M., Robinson P.M. Abrasive wear of tungsten composites. Rotary drilling tests // Mater. Sci. And Eng. 1976. №2. pp. 13-17

5. Третьяк А.А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами // Монография. Издательство “Политехник”. Новочеркасск, 2016. 300 с.

6. Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами// Диссертация на соискание ученой степени д-р. техн. наук: 25.00.14. Новочеркасск, 2017. 319 с

7. Борисов К. А. Разработка методических и технологических рекомендаций по повышению эффективности бурения скважин путем предупреждения аномального износа режущих элементов долот PDC// Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 22.00.14. Новочеркасск, 2020. 172 с.

8. Вовчановский И. Ф. Породоразрушающий инструмент на основе славутича для бурения глубоких скважин. ИСМ АН УССР, Киев: Наукова думка, 1979. 210 с.

9. Рябчиков С.Я. Оптимизация режимных параметров при бурении скважин упрочненным алмазным породоразрушающим инструментом // Технология и техника геологоразведочных работ. - Томск: Известия Томского политехнического университета, 2011. Т. 318. № 1. С.73-77

10. Новикова Н.В., Клименко С.А. Инструменты из сверхтвердых материалов // М.: Машиностроение, 2014. 608 с

11. Корнеев В. А. Разработка буровых резцов, армированных кубическим нитридом бора, и методологических основ для их испытания // Горный информационно аналитический бюллетень. 2023. № 11-1. С. 116–129.

References

1. Fedorov B.V., Nadirov K.S., Korgasbekov D.R., Bajboz A.R., Ratov B.T. Neft' i gaz. 2019. №3. pp. 67–75.

2. Kabdushev A.A., Korgasbekov D.R. Neft' i gaz. 2022. №2. pp. 81–91.

3. Abubakirov V.F., Burimov Yu.G., Gnoevyh A.N., Mezhlumov A.O., Bliznyukov V.Yu Burovye oborudovanie: Spravochnik. Tom. 2: Burovoj instrument [Drilling equipment: Handbook. Vol. 2: Drilling tool], M: OAO «Izdatel'stvo «Nedra», 2003. 494 p.

4. Larsen-Bass J., Perrott C.M., Robinson P.M. Mater. Sci. And Eng. 1976. №2. pp. 13-17

5. Tret'yak A.A. Tekhnologiya bureniya skvazhin koronkami, armirovannymi almazno-tverdosplavnymi plastinami [Technology of drilling wells with crowns reinforced with diamond-carbide plates]. Monografiya. Izdatel'stvo “Politekhnik”. Novocherkassk. 2016. 300 p.

6. Tret'yak A. A. Teoreticheskoe obosnovanie, razrabotka konstruktivnykh parametrov i tekhnologii bureniya skvazhin koronkami, armirovannymi almazno-tverdosplavnymi plastinami [Theoretical substantiation, development of design parameters and technology of drilling wells with crowns reinforced with diamond-carbide plates]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni d-r tekhn. nauk: 25.00.14. Novocherkassk. 2017. 319 p.



7. Borisov K. A. Razrabotka metodicheskikh i tekhnologicheskikh rekomendacij po povysheniyu effektivnosti bureniya skvazhin putem preduprezhdeniya anomal'nogo iznosa rezhushchih elementov dolot PDC [Development of methodological and technological recommendations for improving the efficiency of drilling wells by preventing abnormal wear of the cutting elements of PDC chisels]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk: 25.00.14. Novocherkassk. 2020. 172 p.
8. Vovchanovskij I. F. Porodorazrushayushchij instrument na osnove slavuticha dlya bureniya glubokih skvazhin [Rock-crushing tool based on slavutych for drilling deep wells]. ISM AN USSR, Kiev: Naukova dumka, 1979. 210 p.
9. Ryabchikov S.Ya. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. T. 318. № 1. pp.73-77.
10. Novikova N.V., Klimenko S.A. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov [Tools made of superhard materials]. M.: Mashinostroenie, 2014. 608 p.
11. Korneev V. A. Gornyj informacionno analiticheskij byulleten'. 2023. № 11-1. pp. 116–129.

Дата поступления: 6.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025