



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-231-239>

УДК 622.23.051.78

Теоретические исследования характера и условий взаимодействия с забоем тыльных и периферийных конусов шарошек бурового долота со смещенными осями вращения

Д. А. Борейко¹   , А. А. Лютоев¹ , Д. Ю. Сериков²  ¹ Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация² Российский государственный технический университет (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация diacont_dboreyko@mail.ru

Аннотация

Для увеличения механической скорости бурения при бурении мягких пород используют смещение осей вращения шарошек, которое позволяет увеличить проскальзывание зубьев вооружения по всей площади забоя. Анализ износа зубчатого вооружения бурового инструмента со смещенными осями вращения шарошек показал, что происходит существенное изнашивание («зализывание») переходной зоны от тыльного конуса к основному, и это приводит к существенному снижению механической скорости бурения и быстрому уменьшению диаметра скважины. Целью работы является проведение теоретических исследований характера и условий взаимодействия с забоем тыльных и периферийных конусов шарошек данного вида бурового инструмента для повышения эффективности разрушения породы забоя шарошечным буровым инструментом со смещенными осями вращения шарошек. Для достижения поставленной цели в работе проведён анализ характера износа зубчатого вооружения и причин его возникновения у существующих конструкций шарошечного бурового инструмента; разработана математическая модель в цилиндрической системе координат, позволяющая определять расположение и геометрические параметры зоны контакта калибрующего конуса со стенкой скважины для различных типоразмеров шарошечных буровых долот; разработана компьютерная твердотельная модель для проверки адекватности работы математической модели путём их сравнения; разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента со смещенными осями вращения шарошек. Исследования были проведены методом математического моделирования геометрических фигур и тел, соответствующих шарошкам и скважине. В результате исследований определено, что необходимо внести существенные коррективы в геометрию зубчатого вооружения шарошек (на данный момент патентуется), позволяющие на 15–20 % уменьшить площади площадок притупления периферийных венцов шарошек, а также обеспечить более длительный контакт основных и калибрующих конусов шарошек с поверхностью забоя и стенки скважины. Это позволит снизить повышенный износ зубьев вооружения в зоне перехода образующей от периферийного основного к калибрующему конусу шарошек и даст возможность зубчатому вооружению шарошек более длительный период времени сохранять требуемое удельное давление на разрушаемую породу, диаметр долота и, как следствие, обеспечит увеличение как механической скорости бурения, так и ресурса бурового инструмента.

Ключевые слова

буровое долото, шарошка, скважина, шарошечное бурение, математическое моделирование, разрушение породы, инструмент

Для цитирования

Boreiko D.A., Lutoev A.A., Serikov D.Yu. Theoretical studies on the nature and conditions of interaction of heel and peripheral nose cones of offset roller cone bits with a bottom hole. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):231–239. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-231-239>



MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Theoretical studies on the nature and conditions of interaction of heel and peripheral nose cones of offset roller cone bits with a bottom holeD. A. Boreiko¹   , A. A. Lyutov¹ , D. Yu. Serikov²  ¹ Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation diacont_dboreiko@mail.ru**Abstract**

An offset of roller cone rotation centerlines is used to increase the mechanical penetration rate while drilling in soft rocks. This enables increasing the area of a cutting structure teeth contact with a bottom hole. The analysis of offset cone drill bit (cutting structure) teeth wear showed that particularly significant wear is characteristic of the transition zone from the heel cone to the nose cone, which leads to significant reduction in the mechanical rate of penetration and a rapid decrease in the hole diameter. The purpose of this paper is to conduct a theoretical research on the nature and conditions of interaction between heel and peripheral nose cones of offset roller cone bits with a bottom hole, which is aimed at improving the efficiency of rock cutting by offset roller cone bits. To achieve the purpose, the authors analyzed data on the nature and causes of wear of existing offset roller cone bit cutting structure (teeth); developed a mathematical model in a cylindrical coordinate system allowing to determine the location and geometric parameters of the gage cone contact area with the hole wall for different roller cone bits sizes; developed a computer solid model for checking the adequacy of the mathematical model by comparing these two models; prepared recommendations for further improvement of the design of existing offset roller cone bit cutting structure (teeth). The research was carried out by the method of mathematical simulation of geometric figures and bodies corresponding to roller cones and a hole. The research has revealed that significant adjustments need to be made to the geometry of the roller cone teeth (currently being patented). This would allow decreasing the areas of cone heel blunting by 15–20 % as well as providing more prolonged contact of base and gage cones with bottom hole and wall surfaces. This allows to reduce wear of teeth in the transition zone of the generatrix from the peripheral nose cone to the gage (heel) cone of the roller cone and to maintain the required specific pressure on the cut rock for a longer period of time and, as a result, to increase both the mechanical penetration rate and the service life of the drilling tools.

Keywords

drill bit, roller cone, hole, roller-bit drilling, mathematical simulation, rock destruction, tool

For citations

Boreiko D.A., Lyutov A.A., Serikov D.Yu. Theoretical studies on the nature and conditions of interaction of heel and peripheral nose cones of offset roller cone bits with a bottom hole. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):231–239. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-231-239>

Введение

В настоящее время известны различные подходы, позволяющие оценить эффективность шарошечного бурения, которая зависит от большого количества различных факторов. Их можно разделить на технологические и конструктивные.

Шарошечное долото конструктивно представляет собой породоразрушающий инструмент с шарошками, которые вооружены зубьями и имеют возможность вращаться вокруг собственной оси [1, 2]. В большинстве случаев в конструкциях долот отсутствует смещение осей вращения шарошек относительно оси вращения долота, что позволяет снизить износ вооружения при бурении крепких, твердых и пород средней твердости, а также пород, обладающих повышенной абразивностью [3]. На рис. 1 представлены примеры трёхшарошечного и двухшарошечного долот без

смещения осей вращения шарошек. Особый акцент на рисунке сделан на переходе образующих шарошек от периферийных венцов к тыльным конусам, которые являются калибрующими и формируют диаметр и стенки скважины.

Однако такие долота обладают не самой высокой механической скоростью бурения и проходкой на долото при бурении мягких пород. Для увеличения механической скорости бурения при бурении мягких пород используют параллельное смещение осей вращения шарошек, которое позволяет увеличить проскальзывание зубьев вооружения по всей площади забоя [4]. В то время как в большинстве зарубежных компаний в основном используют угловое смещение осей шарошек, которое обеспечивает меньшие величины проскальзывания зубьев, но позволяет увеличить размеры шарошек [5–7].

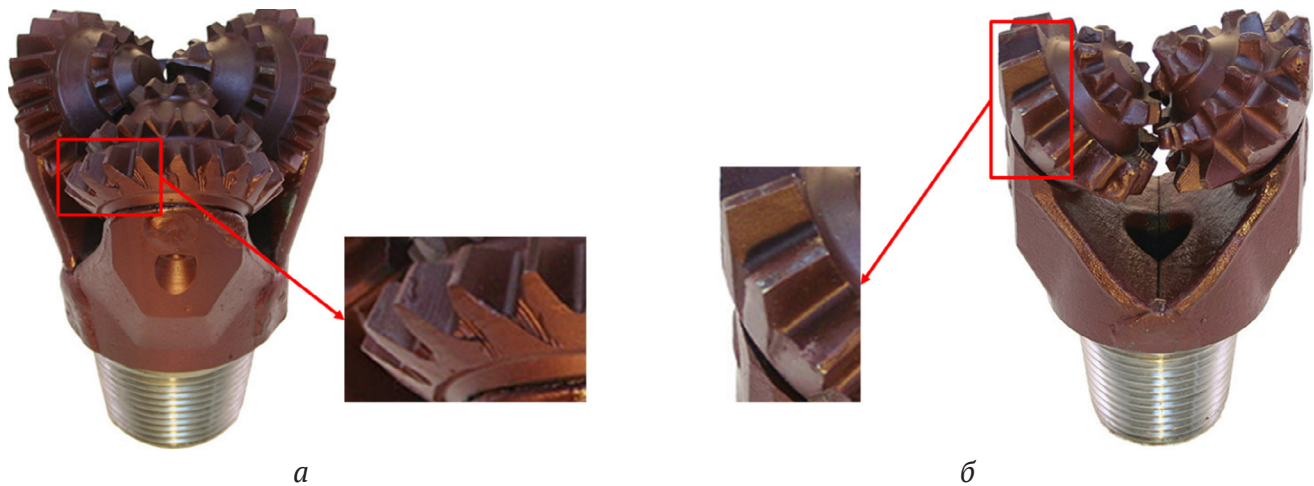


Рис. 1. Варианты конструкций новых (неиспользованных) долот: а – трёхшарошечное долото; б – двухшарошечное долото

Однако анализ износа вооружения шарошечных буровых долот со смещенными осями вращения шарошек после отработки в реальных условиях бурения нефтяных и газовых скважин позволил установить некоторые важные особенности этого процесса [8]. Главной из них является «зализывание» угла, образованного пересечением периферийного основного и калибрующего конусов шарошек (рис. 2). В результате этого процесса происходит увеличение площади «площадки притупления» зубьев периферийных рядов шарошек, что неминуемо приводит к снижению удельного давления на поверхность забоя и, как следствие, снижению разрушающей способности вооружения инструмента [9].

Проведенный анализ износа зубчатого вооружения бурового инструмента в том случае, когда оси вращения шарошек смещены относительно оси вращения долота, позволил установить, что происходит существенное изнашивание («за-

лизывание») переходной зоны от тыльного конуса к основному. Интенсивное изнашивание этой поверхности приводит к увеличению площади «площадки притупления» периферийных зубьев шарошки – самой энергозатратной зоны, работающей одновременно как на калибрование, так и на разрушение периферийной области забоя скважины, т. к. именно в этой части шарошки находятся зубья наибольших размеров, формирующие диаметр скважины и, соответственно, испытывающие наибольшие ударные и истирающие нагрузки [10]. Кроме того, это приводит к быстрой потере диаметра долота и, соответственно, диаметра самой скважины.

Повышение эффективности работы шарошечного бурового инструмента, как правило, связано с уменьшением энергетических затрат при бурении за счет обеспечения соответствия геометрии вооружения условиям работы каждого из венцов шарошек на кольцевых участках

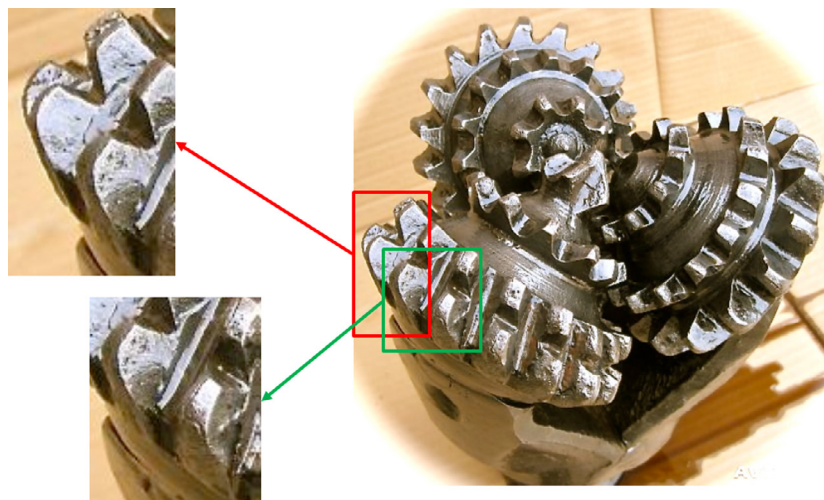


Рис. 2. Иллюстрация износа («зализывания») вершин периферийных венцов и тыльных конусов шарошек со смещенными осями вращения

забоя и физико-механическим свойствам разбу- риваемых горных пород. Таким образом, задача совершенствования конструкции шарошечного бурового инструмента в настоящее время остаётся актуальной [11, 12]. В связи с этим необходимо исследовать причины возникновения указанных негативных процессов при бурении скважины шарошечными долотами со смещёнными осями вращения шарошек относительно оси вращения инструмента.

Цель и задачи исследований

Целью работы является повышение эффективности разрушения породы забоя шарошечным буровым инструментом со смещёнными осями вращения шарошек на основе проведения теоретических исследований характера и условий взаимодействия с забоем тыльных и периферийных конусов шарошек данного вида бурового инструмента.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Анализ характера износа зубчатого вооружения и причин его возникновения у существующих конструкций шарошечного бурового инструмента.

2. Разработка математической модели в цилиндрической системе координат, позволяющей определять расположение и геометрию зоны контакта калибрующего конуса со стенкой скважины для различных типоразмеров шарошечных буровых долот.

3. Разработка компьютерной твердотельной модели для проверки адекватности работы математической модели путём их сравнения.

4. Разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкции зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента со смещёнными осями вращения шарошек.

Методология исследований

Исследования по определению положения зоны контакта большого основания калибрующего конуса со стенкой скважины были проведены методом математического моделирования геометрических фигур и тел, соответствующих шарошкам и скважине с учетом ряда упрощений и допущений [13]. Так, например, известно, что конструктивно все шарошки буровых долот состоят из корпуса (тела) шарошки и непосредственно вооружения, представляющего собой фрезерованные или твердосплавные зубки. В свою очередь, корпус (тело) шарошки состоит из нескольких сопряженных между собой конусов, которые в общем и целом можно усредненно разделить на два тела: основной и калибрующий конусы, как показано на рис. 3. Таким образом, конструктивно стандартная конструкция шарошки представляет собой сдвоенный конус (основной + калибрующий). Важной особенностью такой конструкции является то, что переходная зона образуется под углом $\gamma = 90^\circ$ между образующими основного и калибрующего конусов.

Другим упрощением в модели является сама форма моделируемого тела – это основной конус и переходная плоскость θ , являющаяся общей и для основного, и для калибрующего конуса. Эта плоскость представляет научный интерес для исследования, т. к. зона касания со стенкой скважины принадлежит именно ей.

Для математического моделирования применяются методы преобразования координат, составления системы уравнений цилиндра, наклонного конуса и переходной плоскости θ , проходящей через точку их контакта (рис. 4). Для этого на первом этапе было создано геометрическое описание исследуемых тел в цилиндрической системе координат для конуса шарошки без смещения её оси относительно оси скважины.

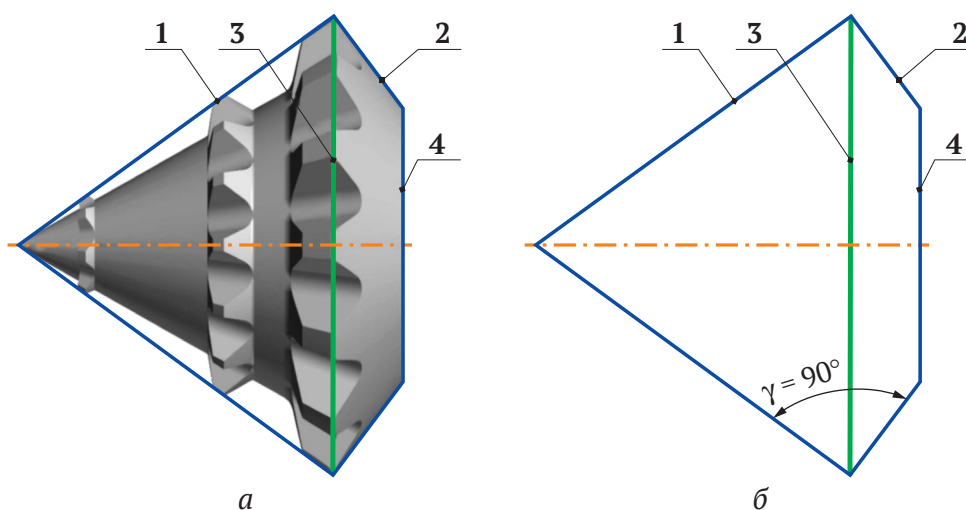


Рис. 3. Упрощение геометрии шарошки перед моделированием:

a – модель шарошки с фрезерованным зубчатым вооружением; *б* – эскиз продольного сечения конусов шарошки; 1 – основной конус; 2 – калибрующий конус; 3 – ребро переходной поверхности θ (большого основания калибрующего конуса); 4 – ребро малого основания калибрующего конуса; γ – угол между образующими основного и калибрующего конусов

Как видно из рис. 4, точка M контакта конуса и скважины принадлежит одновременно и стенке цилиндра скважины, и основанию (забою) скважины. Такое положение создаёт идеальный контакт боковой поверхности калибрующего конуса со стенкой скважины, когда «зализывания» периферийных венцов, показанного на рис. 2, не произойдёт.

Далее ось геометрической модели конуса смещают вдоль осей X и Y относительно оси геометрической модели скважины на расстояния dx и dy соответственно. При таком смещении оси конуса точка M изменяет своё пространственное положение, смещаясь вверх по стенке цилиндра скважины, и «нависает» над забоем, теряя контакт с ним. При таком положении возникает резкое вдавливание периферийных венцов шарошки в горную породу, в результате чего начинается процесс их сильного износа («зализывания») и формируется округлая переходная зона. В рассматриваемой геометрической модели для определения уравнения конуса и уравнения цилиндра введем две системы координат $OXYZ$ и $O'X'Y'Z'$ (рис. 5).

С учетом параллельного переноса dx и dy и поворота на угол β системы $O'X'Y'Z'$ относительно $OXYZ$ имеем:

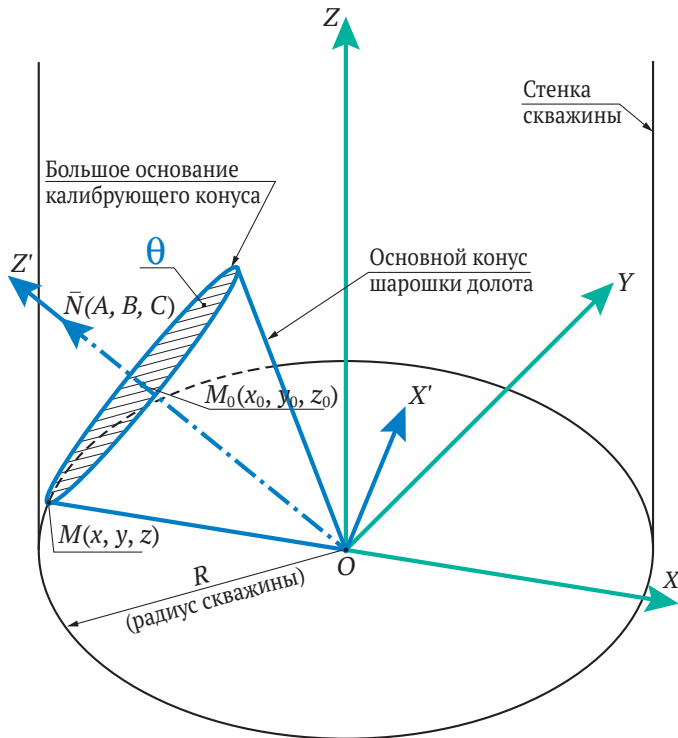


Рис. 4. Геометрическая модель конуса шарошки без смещения оси:

M – точка касания большого основания конуса и скважины;
 M_0 – центр большого (переходного) основания конуса

$$\begin{cases} x' = (x - dx) \cos \beta + z \sin \beta; \\ y' = y - dy; \\ z' = z \cos \beta - x \sin \beta. \end{cases} \quad (1)$$

Задача по нахождению координат точки M была сведена к нахождению точки касания цилиндра, заданного соответствующим уравнением, и конуса, «заваленного на бок» под углом β , с основанием, заданным плоскостью θ .

Уравнение цилиндра имеет вид:

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (2)$$

Уравнение конуса в каноническом виде в системе координат $O'X'Y'Z'$ записывается следующим образом:

$$x'^2 + y'^2 = \frac{z'^2}{c^2}, \quad (3)$$

где c – константа конуса (угловой коэффициент).

Сечение конуса плоскостью $OY'Z'$ задается уравнением $z = \pm cy$. Тогда угловой коэффициент прямой сечения c (рис. 6, а) равен:

$$c = \operatorname{tg}(90 - \alpha) = \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Уравнение (3) примет следующий вид:

$$x'^2 + y'^2 = \frac{z'^2}{\operatorname{ctg}^2 \alpha}. \quad (5)$$

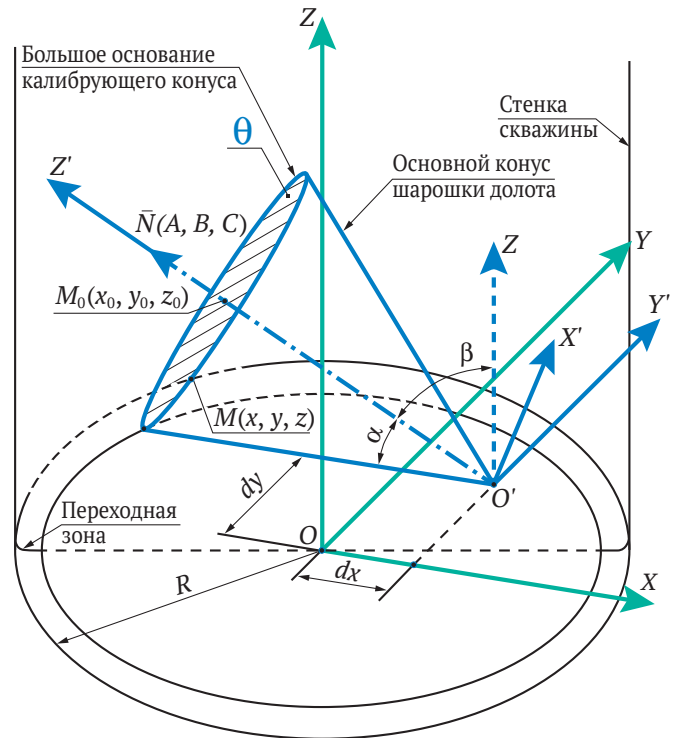


Рис. 5. Геометрическая модель конуса шарошки со смещением оси:

α – угол между $O'Z'$ и образующей конуса;
 β – угол поворота оси конуса относительно OZ ;
 dx – смещение оси конуса относительно OX ;
 dy – смещение оси конуса относительно OY

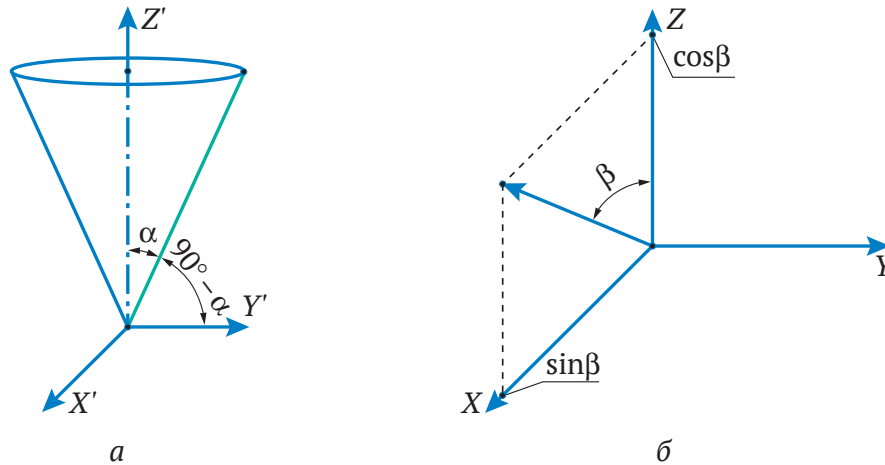


Рис. 6. Геометрическая модель конуса $O'X'Y'Z'$:

a – геометрическая модель конуса $O'X'Y'Z'$; b – определение координат нормального вектора плоскости θ ; α – угол конуса

Имея в виду, что:

$$\frac{1}{\text{ctg } \alpha} = \text{tg } \alpha, \quad (6)$$

$$\alpha = 90^\circ - \beta \Rightarrow \text{tg}(90^\circ - \beta) = \text{ctg } \beta, \quad (7)$$

и преобразование (1) переноса и поворота, получим уравнение конуса в системе координат $OXYZ$:

$$\begin{aligned} ((x-dx)\cos\beta + z\sin\beta)^2 + (y-dy)^2 = \\ = (z\cos\beta - x\sin\beta)^2 \text{ctg}^2 \beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Плоскость θ , проходящая через точку M_0 перпендикулярно вектору нормали $\vec{N}(A;B;C)$, в общем виде задается уравнением:

$$A(x-x_0) + B(y-y_0) + C(z-z_0) = 0. \quad (9)$$

Учитывая то, что нормальным вектором плоскости θ является ось конуса, который получен поворотом относительно оси OY на угол β (рис. 6, б), получим $\vec{N}(\sin\beta; 0; \cos\beta)$.

Тогда уравнение плоскости θ записывается следующим образом:

$$\sin\beta(x-x_0) + \cos\beta(z-z_0) = 0. \quad (10)$$

Результаты исследований

Таким образом, для нахождения точки M необходимо решить систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2; \\ (x-dx)(\cos\beta + z\sin\beta)^2 + (y-dy)^2 = \\ = (z\cos\beta - x\sin\beta)^2 \text{ctg}^2 \beta; \\ \sin\beta(x-x_0) + \cos\beta(z-z_0) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Полученная система уравнений (11) позволит определять координаты точки M для различных типоразмеров долот при бурении скважин различного диаметра.

После математического моделирования были построены компьютерная твердотельная модель шарошки, аналогичная её геометрической модели, а также модель цилиндра скважины, с целью проверки сходимости результатов и визуализации искомой зоны контакта. На рис. 7 представлены модели шарошек и скважины, созданные в отечественной системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.

Из рисунка видно, что в твердотельной модели зона контакта калибрующего конуса шарошки определена в той же области, что и математическая. Это свидетельствует об адекватности обеих моделей и корректности полученных результатов.

Для минимизации быстрого износа и образования «площадки притупления» в долоте со смещёнными осями шарошек необходимо добиться полного контакта боковой поверхности калибрующего конуса со стенкой скважины, как это есть в стандартных долотах без смещения [14]. Чтобы получить такой контакт, необходимо увеличить угол γ между образующими основного и калибрующего конусов до тех пор, пока малое основание калибрующего конуса не соприкоснётся со стенкой скважины таким же образом и одновременно с его переходной плоскостью θ . Такое положение получено нами итеративным способом в компьютерной твердотельной модели, представленной на рис. 7, г.

Для достижения такого результата было смоделировано несколько последовательных итераций по увеличению угла γ до значения, которое составило в итоге $97,7913^\circ$. Продольное dx и поперечное dy смещения в соответствии со схемой (рис. 7, б) составили +5,4839 мм и +11,8789 мм и были также определены итеративно. Результат моделирования свидетельствует о том, что искомая геометрия калибрующего конуса может быть определена и математически, аналогично математической модели зоны контакта переходной плоскости со стенкой скважины.

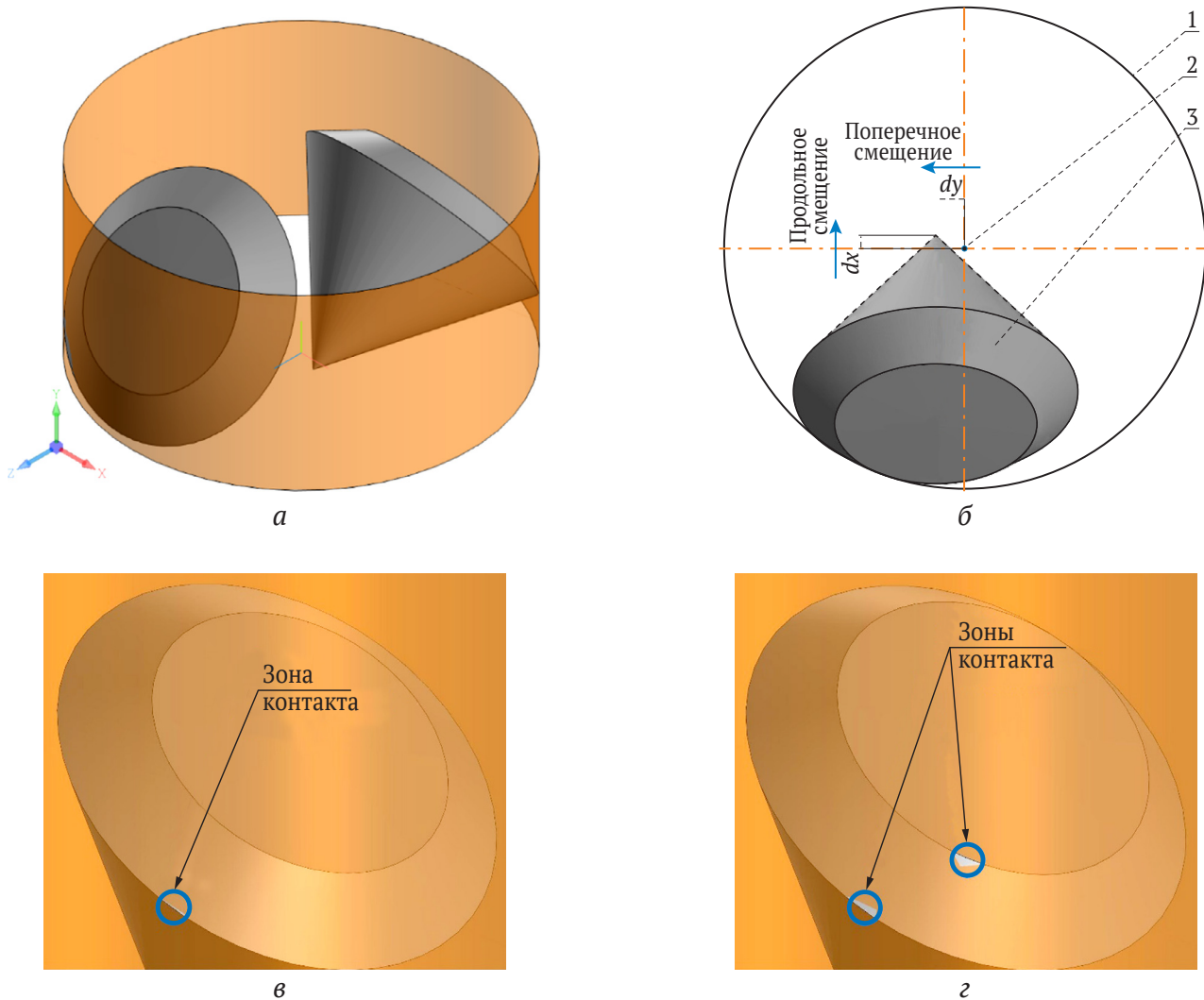


Рис. 7. Результат 3D-моделирования зоны контакта плоскости θ со скважиной: a – модель расположения моделей конусов шарошек внутри модели цилиндра скважины; b – схема смещения оси вращения модели шарошки; v – результат моделирования зоны контакта; z – результат 3D-моделирования зон контакта одновременно двух оснований калибрующего конуса со стенкой скважины; 1 – стенка модели скважины; 2 – ось модели скважины; 3 – модель шарошки

За счёт такой конструкции шарошки появится возможность более длительного поддержания требуемого удельного контактного давления для эффективного разрушения породы [15]. Всё это в комплексе позволит увеличить механическую скорость бурения и сохранить диаметр скважины в процессе всей работы буровым инструментом.

Направления дальнейших исследований

Для окончательного достижения цели исследований необходимо определение полной геометрии калибрующего конуса, при которой контакт его поверхности со стенкой скважины будет осуществляться по линии, соединяющей точку M , принадлежащую переходной плоскости θ , и аналогичную точку, принадлежащую малому основанию, координаты которой определяются на основании разработанной математической модели

с учетом угла наклона γ . Для этого будет разработана математическая модель, описывающая указанную линию, принадлежащую одновременно и внутренней боковой поверхности цилиндра скважины, и боковой поверхности калибрующего конуса, обеспечивающей равномерное «пятно контакта» (в настоящее время патентуется).

Заключение

Проведенные теоретические исследования позволили установить причины неравномерного износа зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента со смещенными осями вращения шарошек относительно оси вращения инструмента – это несоответствие в полной мере геометрии вооружения долота кривизне стенки скважины в области перехода образующей основного конуса шарошки к калибрующему, а также кинематическим особенностям шарошек со



смещенными осями вращения относительно оси вращения бурового инструмента.

Разработана математическая модель пересечения плоскости θ переходного основания конуса модели шарошки в области её касания с цилиндром модели скважины, которая позволяет создавать геометрию зубчатого вооружения шарошек, позволяющую существенно уменьшить неравномерность износа зубьев периферийных венцов шарошек и их калибрующих поверхностей таким образом, что при износе вооружения площадь «площадки притупления» зубьев на 15–20 % меньше, чем у вооружения аналогичных стандартных шарошек. Математическая модель была верифицирована путём сравнительного сопоставления с результатами твердотельного компьютерного моделирования, которое показало хорошую сходимость результатов.

Проведённые исследования показали, что необходимо внести существенные коррективы в геометрию зубчатого вооружения шарошек (на данный момент патентуется), позволяющие на 15–20 % уменьшить площади площадок притупления периферийных венцов шарошек, а также обеспечить более длительный контакт основных и калибрующих конусов шарошек с поверхностью забоя и стенки скважины. Это позволит снизить повышенный износ зубьев вооружения в зоне перехода образующей от периферийного основного к калибрующему конусу шарошек и даст возможность зубчатому вооружению шарошек более длительный период времени сохранять требуемое удельное давление на разрушаемую породу, диаметр долота и, как следствие, обеспечит увеличение как механической скорости бурения, так и ресурса бурового инструмента.

Список литературы

1. Палий П. А., Корнеев К. Е. *Буровые долота*. Справочник. 3-е изд. М.: Недра; 1971. 445 с.
2. Масленников И. К., Матвеев Г. И. *Инструмент для бурения скважин*. Справочное пособие. М.: Недра; 1981. 335 с.
3. Шигин А. О., Гилев А. В., Шигина А. А. Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(4):325–333.
4. Сериков Д. Ю., Пиканов К. А. Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурильного инструмента. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2014;(5):20–22.
5. Warran T. M. Penetration-rate performance of roller-cone bits. *SPE Drilling & Completion*. 1987;2(01):9–18. <https://doi.org/10.2118/13259-PA>
6. Hamrick T. R. *Optimization of operating parameters for minimum mechanical specific energy in drilling*. [Dissertation of Doctor of Philosophy.] Morgantown, West Virginia. 2011. 147 p.
7. Hea W., Chen Y., He J., Xiong W., Tang T., OuYang H. Spherical contact mechanical analysis of roller cone drill bits journal bearing. *Petroleum*. 2016;2(2):208–214. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.03.002>
8. Агошашвили Т. Г. Качественный анализ величин скольжений в долотах со смещенными осями шарошек. В: *Научные труды ВНИИБТ «Теория и техника бурения»*. 1967. Вып. 17. С. 144–154.
9. Близнюков В. Ю., Сериков Д. Ю. Шарошечное буровое долото со сфероконическими шарошками. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2020;(5):28–32. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-5\(329\)-28-32](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-5(329)-28-32)
10. Богомолов Р. М. *Методы повышения эффективности разрушения горных пород при бурении шарошечными долотами*. [Дис... докт. техн. наук]. М.: НПО «Буровая техника»; 2001. 434 с.
11. Стеглянов Б. Л. *Повышение эффективности породоразрушающих буровых инструментов на основе сравнительного анализа кинетических характеристик их вооружения*. [Дис. ... докт. техн. наук]. М.; 1988. 393 с.
12. Повалихин А. С., Близнюков В. Ю. Освоение инновационных технологий строительства скважин на основе опорно-технологического бурения. *Инженер-нефтяник*. 2014;(2):5–9. URL: http://www.ids-corp.ru/files/oil_engineer/pdf/in2014-2.pdf
13. Быков И. Ю., Смирнов А. Л., Борейко Д. А. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с искусственными дефектами. *Инженер-нефтяник*. 2013;(1):40–43. URL: http://www.ids-corp.ru/files/oil_engineer/pdf/in2013-1.pdf
14. Богомолов Р. М., Носов Н. В. *Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений*. В 2-х частях. М.: Инновационное машиностроение; 2015. 826 с.
15. Богомолов Р. М., Сериков Д. Ю. Совершенствование вооружения шарошечного бурового долота. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2018;(5):24–28. <https://doi.org/10.30713/1999-6934-2018-5-24-28>

References

1. Paliy P. A., Korneev K. E. *Drill bits*. Handbook. 3rd Ed., Moscow: Nedra Publ.; 1971. 445 p. (In Russ.)
2. Maslennikov I. K., Matveev G. I. *Tools for drilling boreholes*. Reference manual. Moscow: Nedra Publ.; 1981. 335 p. (In Russ.)



3. Shigin A. O., Gilev A. V., Shigina A. A. Stresses and stability of rolling cutter bits in complex-structure rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(4):325–333. (In Russ.)
4. Serikov D. Yu., Pikanov K. A. Some methodology of determining location of momentary rotational axis of a drill bit cutter. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2014;(5):20–22. (In Russ.)
5. Warran T. M. Penetration-rate performance of roller-cone bits. *SPE Drilling & Completion*. 1987;2(01):9–18. <https://doi.org/10.2118/13259-PA>
6. Hamrick T. R. *Optimization of operating parameters for minimum mechanical specific energy in drilling*. [Dissertation of Doctor of Philosophy.] Morgantown, West Virginia. 2011. 147 p.
7. Hea W., Chen Y., He J., Xiong W., Tang T., OuYang H. Spherical contact mechanical analysis of roller cone drill bits journal bearing. *Petroleum*. 2016;2(2):208–214. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.03.002>
8. Agoshashvili T. G. Qualitative analysis of teeth slippage values in offset roller cone bits. In: *Scientific works VNIIBT Publ. "Theory and technique of drilling"*. 1967. Rel. 17. Pp. 144–154. (In Russ.)
9. Bliznyukov V. Yu., Serikov D. Yu. A drill bit with sphero-conical rolling-cutter drill bits. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2020;(5):28–32. (In Russ.) [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-5\(329\)-28-32](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-5(329)-28-32)
10. Bogomolov R. M. *Methods to increase the efficiency of rock destruction when drilling with roller cone bits*. [Doctoral thesis in Engineering Science]. Moscow: NPO "Drilling Technics"; 2001. 434 p. (In Russ.)
11. Steklyanov B. L. *Increasing the performance of rock destruction drilling tools based on a comparative analysis of the kinetic characteristics of their cutting structures*. [Doctoral thesis in Engineering Science]. Moscow; 1988. 393 p. (In Russ.)
12. Povalihin A. S., Bliznyukov V. Yu. Learning to use novel technologies for well construction on the basis of key well drilling. *Inzhener-Neftyanik*. 2014;(2):5–9. (In Russ.) URL: http://www.ids-corp.ru/files/oil_engineer/pdf/in2014-2.pdf
13. Bykov I. J., Smirnov A. L., Borejko D. A. Stress-deformed state of cylindrical specimen with artificial defects: computer modeling. *Inzhener-Neftyanik*. 2013;(1):40–43. (In Russ.) URL: http://www.ids-corp.ru/files/oil_engineer/pdf/in2013-1.pdf
14. Bogomolov R. M., Nosov N. V. *Drilling tools. Encyclopedia of Inventions*. (In 2 parts). Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie Publ.; 2015. 826 p. (In Russ.)
15. Bogomolov R. M., Serikov D. Yu. Improvement of the cutting structures of the rolling cutter drill bits. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2018;(5):24–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.30713/1999-6934-2018-5-24-28>

Информация об авторах

Дмитрий Андреевич Бореико – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0248-4526](https://orcid.org/0000-0002-0248-4526), Scopus ID [56912272500](https://scopus.com/authorid/56912272500); e-mail diacont_dboreyko@mail.ru

Александр Анатольевич Лютоев – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация; Scopus ID [57208719323](https://scopus.com/authorid/57208719323); e-mail allyutoev@yandex.ru

Дмитрий Юрьевич Сериков – доктор технических наук, доцент кафедры стандартизации, сертификации и управления качеством производства нефтегазового оборудования, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3256-580X](https://orcid.org/0000-0003-3256-580X), Scopus ID [6506405788](https://scopus.com/authorid/6506405788); e-mail serrico@yandex.ru

Information about the authors

Dmitry A. Boreiko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Machines and Equipment of Oil and Gas Industry, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0248-4526](https://orcid.org/0000-0002-0248-4526), Scopus ID [56912272500](https://scopus.com/authorid/56912272500); e-mail diacont_dboreyko@mail.ru

Alexander A. Lutoev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Advanced Mathematics, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation; Scopus ID [57208719323](https://scopus.com/authorid/57208719323); e-mail allyutoev@yandex.ru

Dmitry Yu. Serikov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Standardization, Certification and Quality Management of Oil and Gas Equipment Manufacturing, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3256-580X](https://orcid.org/0000-0003-3256-580X), Scopus ID [6506405788](https://scopus.com/authorid/6506405788); e-mail serrico@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022
Поступила после рецензирования 28.08.2022
Принята к публикации 01.09.2022

Received 23.03.2022
Revised 28.08.2022
Accepted 01.09.2022