

УДК 622.24

DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-1-46-55

Научная статья

EDN: MDXHKN

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКООБОРОТНОГО АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

В.И. СкляновФГБОУ ВО «Российский
государственный геологоразведочный
университет имени Серго
Орджоникидзе» (МГРИ), Москва, РФ

Проведен сравнительный анализ известных методов передачи и преобразования механической и других видов энергии для высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра. Отмечено, что при реализации технологического процесса передачи механической энергии от устья к забою скважины вращательным (роторным) способом с увеличением глубины скважин увеличиваются энергозатраты на преодоление сил трения бурильных труб о стенки скважины. Это приводит к увеличению мощности привода, повышенному износу бурильных труб, к разработке ствола скважины, образованию каверн, желобов, обрушению пород стенок скважины, а также к тяжелым авариям, связанным с поломкой и обрывом колонны бурильных труб. Наиболее эффективным для высокооборотного бурения автором предложен метод роторного (колонкового) бурения с повышением частоты вращения колонковой трубы и алмазной коронки за счет применения роторно-мультипликаторного бура (РМБ) в нижней части колонны бурильных труб.

Ключевые слова: высокооборотное алмазное бурение, бурильная колонна, роторно-мультипликаторный бур, синусо-шариковая передача

Original article

A SYSTEMS ANALYSIS OF THE APPLICATION OF KNOWN METHODS AND DEVICES FOR CONVERTING AND TRANSMITTING MECHANICAL ENERGY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED DIAMOND DRILLING AT GREAT DEPTHS OF EXPLORATION WELLS

V.I. SKLYANOVFEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
"SERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE
GEOLOGICAL PROSPECTING UNIVERSITY
(MGRI), Moscow, RF

A comparative analysis of known methods of transmitting and converting mechanical and other types of energy for high-speed diamond drilling at great depths in small-diameter exploratory boreholes was conducted. It was noted that when implementing the process of transmitting mechanical energy from the wellhead to the bottomhole using a rotary (rotary) method, the energy consumption required to overcome the friction forces of the drill pipe against the borehole walls increases with increasing borehole depth. This leads to increased drive power, increased wear of the drill pipe, development of the borehole, formation of caverns, chutes, collapse of the borehole walls, and serious accidents associated with breakage and breakage of the drill string. The author proposes rotary (core) drilling, which increases the rotational speed of the core barrel and diamond bit due to the increased rotational speed of the core barrel and diamond bit, as the most effective method for high-speed drilling. Using a rotary multiplier drill (RMB) at the bottom of a drill string.

KEYWORDS: High-speed diamond drilling, drill string, rotary multiplier drill, sine-ball drive

© В.И. Склянов

Поступила в редакцию 28.10.2025

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области разрушения твердых горных пород алмазным инструментом, опыт и технологии буровых работ и камнеобработки указывают, что резервы роста механической скорости бурения связаны, прежде всего, с повышением скорости перемещения алмазных резцов. В то же время рост скорости перемещения алмазных резцов происходит при повышении частоты вращения бурильных колонн, которая ограничивается реальными условиями бурового процесса. Например, при бурении глубоких скважин (до 1000 м и более) диаметром 76 и 59 мм алмазным породоразрушающим инструментом частота вращения колонны бурильных труб не превышает 350 мин⁻¹ (при больших значениях этой величины бурильные трубы ломаются чаще, имеют больший износ и бурение происходит при существенно повышенных расходах мощности на преодоление сопротивлений при трении о стенки скважины). При этом, линейная скорость резания не превышает 1–1,5 м/сек, что, как известно, недостаточно для алмазного инструмента (рекомендуемая скорость резания для импрегнированных алмазных коронок 3–5 м/сек). Соответственно, применяемые частоты вращения алмазного бурового наконечника существенно ниже оптимальных. А с ростом глубины скважин снижается эффективность передачи механической энергии к забою скважины. Исходя из этого, при бурении разведочных скважин колонковым способом алмазным инструментом возникает необходимость в дополнительном повышении частоты вращения колонкового набора бурильной колонны.

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ УСТЬЯ К ЗАБОЮ СКВАЖИНЫ И ЕЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Диапазон глубин бурения разведочных скважин при поисках и разведке полезных ископаемых очень широк и охватывает скважины глубиной от нескольких до нескольких тысяч метров. Нижний предел этого диапазона в настоящее время превосходит глубину 3000 м. В 1977 г. существующий параметрический ряд подразделяет все буровые установки на 8 классов, от-

личающихся значениями основных параметров – грузоподъемностью, глубиной бурения, мощностью привода [16] (табл. 1).

По глубине скважин выделяют бурение неглубоких, глубоких и сверхглубоких скважин. Этот признак весьма условен. Для геологоразведочных работ (на твердые полезные ископаемые) можно считать неглубокими скважины глубиной от нескольких десятков до 300 м, глубокими – до 1000–2000 м, сверхглубокими – более 2000 м. На золоторудных месторождениях в Южной Африке глубины скважин достигают 4500 м [15]. При бурении скважин на нефть и газ эти цифры существенно меняются: мелкие скважины – до 1000–2000 м, глубокие – до 4000–5000 м и сверхглубокие – до 10 000 м и более.

По частоте вращения бурильной колонны выделяют следующие виды бурения: низкооборотное (до 300 мин⁻¹), на повышенных частотах вращения (до 700 мин⁻¹), высокооборотное (свыше 700 мин⁻¹) [18]. Соответственно, понятие «алмазное высокооборотное колонковое бурение» – это бурение на частотах вращения бурильной колонны свыше 700 мин⁻¹.

При реализации технологического процесса передачи механической энергии от устья к забою скважины для разрушения горных пород при высокооборотном бурении разведочных скважин вращательным (роторным) способом с увеличением глубины скважин увеличиваются энергозатраты на преодоление сил трения бурильных труб о стенки скважины. Это приводит к увеличению мощности привода, повышенному износу бурильных труб, к разработке ствола скважины, образованию каверн, желобов, обрушению пород стенок скважины, а также к тяжелым авариям, связанным с поломкой и обрывом колонны бурильных труб.

Особенно при алмазном бурении, требующем высокой частоты вращения для разрушения пород забоя скважины, существенно вырастают непроизводительные затраты мощности на вращение бурильной колонны, что приводит к вынужденному ограничению частот вращения алмазного ПРИ и, соответственно, к непрерывному снижению механической скорости бурения. В итоге все это усложняет строительство

ТАБЛИЦА 1

Параметрический ряд буровых установок для бурения геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые

Класс буровой установки	Номинальная глубина бурения, м	Номинальная грузоподъемность, даН	Максимальная грузоподъемность, даН	Номинальная мощность привода, кВт
1	25	125	200	3
2	100	630	1000	11
3	300	2000	3200	15
4	500	3200	5000	22
5	800	5000	8000	30
6	1200	8000	12500	45
7	2000	12500	20000	55
8	3000	20000	32000	75

глубоких разведочных скважин, увеличивает сроки строительства, приводит к удорожанию работ.

В скважинах малого диаметра (76 мм и менее [18]) при неизменной частоте вращения бурильной колонны скорость перемещения алмазного резца по породе забоя будет ниже, чем в скважинах большего диаметра (рис. 1), соответственно, и ниже механическая скорость бурения.

В Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции (НКГРЭ) буровой установкой УКБ-8 с применением КССК-76 в 1980–1990-х гг. бурили геологоразведочные скважины до 3000 м. Частота вращения бурильной колонны при этом не превышала 350 мин^{-1} , а при достижении больших глубин была еще меньше.

Показателен опыт бурения в 1978–1979 гг. глубокой скважины (3500 м) при испытании буровой установки УКБ-8 бригадой Н.Г. Дюкарева в Кировском ПГО на Украине. Если в интервале до 1000 м частота вращения коронки 02ИЗ-59 достигала 800 мин^{-1} , механическая скорость бурения составляла 3–4 м/ч, то на глубине 2000 м частота вращения инструмента была равна $500\text{--}550 \text{ мин}^{-1}$, механическая скорость 2 м/ч, на глубине 3000 м $360\text{--}400 \text{ мин}^{-1}$, механическая скорость менее 2 м/ч, а заканчивали скважину при бурении с частотой вращения колонны не более 375 мин^{-1} , что позволило получить механическую скорость бурения в среднем около 1 м/ч.

Исследования возможности применения малогабаритных турбобуров и электробуров для высокооборотного алмазного бурения, проведенные в ВИТРе, показали, что характеристики предполагаемого турбобура диаметром 70 мм смогут обеспечить работу

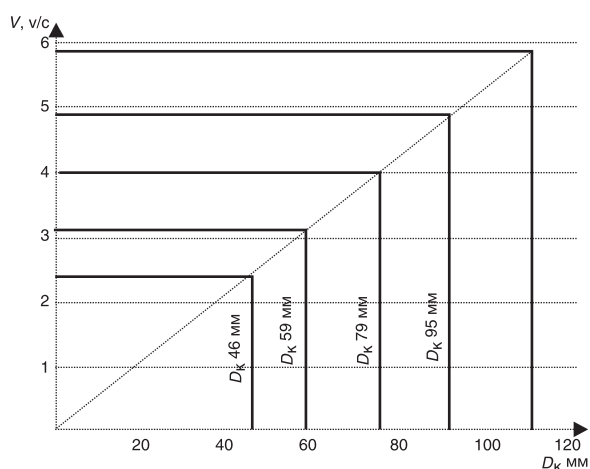


РИС. 1.

Зависимость скорости перемещения резцов алмазной коронки v (м/с) по породе забоя (взята по наружному диаметру коронки) от диаметра коронки D_k (мм) при частоте вращения 1000 мин^{-1}

В. И. СКАЯНОВ
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ
МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
И ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКООБОРОТНОГО АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА
БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

коронки при осевой нагрузке не более 400 кг, т.е., такой турбобур не будет обеспечивать рациональные режимы бурения и не может использоваться на депрессии, а электробур не будет развивать требуемой полезной мощности и требуемая осевая нагрузка на коронку превысит критическую на электробур в 1,4 раза.

Стремление специалистов-исследователей отказаться от жесткой составной бурильной колонны привело к появлению шлангокабеля и колтюбинга. Колтюбинг решает проблему, связанную с внедрением электробуров, так как появляется возможность подачи электроэнергии к забою по сплошному электротрансмультипликатору.

Однако эти два направления предполагают применение забойных двигателей и не лишены вышеуказанных недостатков ГЗД и электробура. Кроме того, вращение ПРИ обеспечивается забойным двигателем, который установлен на колонне гибких труб (КГТ), имеющую малую жесткость при работе на скручивание, изгиб и сжатие. Это накладывает дополнительные ограничения на выбор оборудования и режимы бурения.

Все вышеуказанные проблемы можно решить, используя механическую передачу в качестве забойного мультипликатора, способного кратно увеличить частоту вращения алмазной коронки по сравнению с бурильной колонной.

Карагандинским политехническим институтом разработана конструкция бурового инструмента в виде алмазно-планетарной буровой головки для бурения в породах с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протодяконова 10 и выше [7]. Инструмент выполнен в виде планетарного исполнительного органа, оснащенного алмазными режущими элементами, рабочая поверхность которых представляет собой усеченные сферы, армированные по периферии алмазными сегментами. Создание такого инструмента для разрушения крепких пород при бурении скважин позволяет на основе применения алмазов зернистостью А630/500-А1000/800 получить равномерный и полный износ в процессе работы, благодаря одинаковой абсолютной скорости резания для всех алмазных зерен и, как следствие этого, одинаковой нагруженности инструмента во всей его рабочей поверхности.

Характерной особенностью алмазной планетарной буровой головки с турбинным приводом (рис. 2), инструмент которой выполнен в виде усеченных сфер, армированных по периферии алмазными сегментами, является эффективная скорость резания мелкоалмазным инструментом в диапазоне 30–50 м/с. Это определяет малые усилия резания и, следовательно, малые крутящие моменты на рабочем валу, что облегчает конструктивную компоновку мощных и малогабаритных планетарных органов. Расчеты и конструктивная проработка показали, что таким инструментом могут буриться скважины диаметром 0,15 м и более.

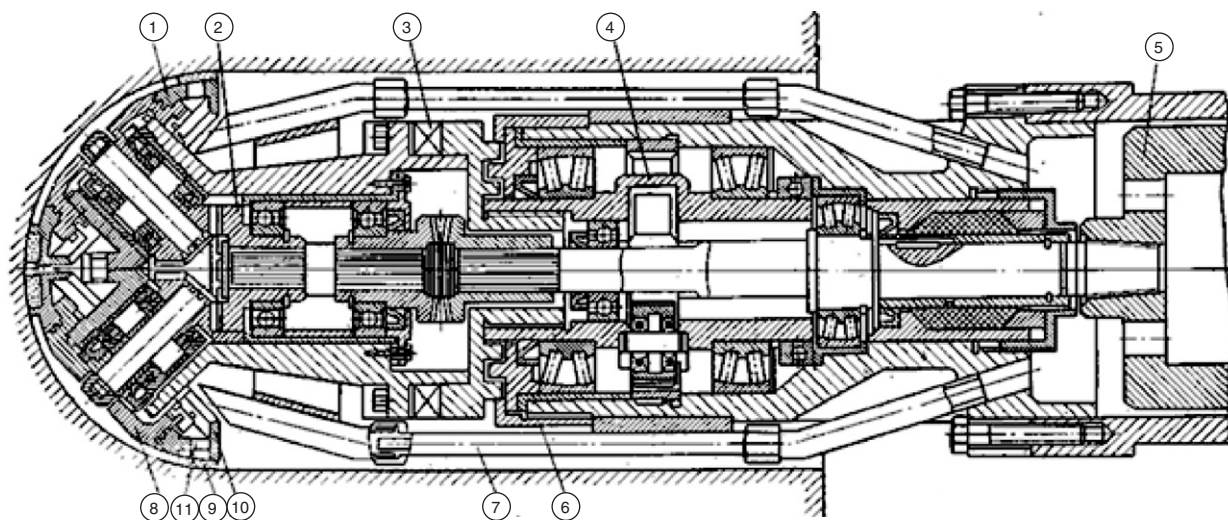


РИС. 2.

Алмазная планетарная буровая головка с турбинным приводом: 1 – режущие элементы; 2 – распределительный редуктор; 3 – кулачковая муфта; 4 – планетарный редуктор; 5 – корпус привода; 6 – зубчатая муфта; 7 – каналы для охлаждающей жидкости; 8 – ступица режущего диска; 9 – алмазные сегменты; 10 – конусные перегородки; 11 – межсегментные отверстия

Алмазные сегменты располагают только по периферийной части и поэтому обработка всего забоя производится быстро вращающимися дисками при их планетарном движении вокруг вертикальной оси бурового снаряда. Для предотвращения попадания абразивного материала к подшипниковым узлам буровой головки и обеспечения охлаждения рабочей поверхности дисков жидкость подается через полый корпус к центру вращающихся дисков так, что омывает подшипниковые узлы и далее движется под действием напора и центробежных сил от подшипниковых узлов по внутренней поверхности дисков и через радиальное отверстие в них непосредственно в зону разрушения. Диаметр дисков и угол наклона их осей выбраны с учетом обеспечения полной обработки забоя в процессе бурения скважины.

Относительное движение режущие элементы получают непосредственно от привода через центральный вал планетарного редуктора, зубчатую муфту и распределительный редуктор.

Переносное движение режущих элементов осуществляется за счет их вращения вместе с корпусом распределительного редуктора. Для охлаждения режущих элементов и транспортирования отбитой породы в зону резания подается охлаждающе-транспортирующая жидкость.

Применение такого устройства в колонковом бурении с отбором керна не представляется возможным из-за необходимости размещения в центре распределительного редуктора, передающего вращение режущим элементам.

Ворошиловградским СКБ НПО «Союзгеотехника» было предложено устройство для бурения скважин [1], которое снабжено дополнительным при-

водом, соединенным с подвижной приводной головкой, у которой корпус жестко соединен с наружной колонной трубой, а шпиндель посредством шлицов – с внутренней колонной трубой, при этом в нижней части буровой колонны установлен мультипликатор планетарного дифференциала с переходной головкой, у которого венцовая шестерня жестко соединена с наружной колонной трубой, а сателлиты посредством вала со шлицами и шлицевого зацепления – с внутренней. Однако такое устройство очень сложно, ввиду необходимости применения двойной колонны труб и дополнительного привода, кроме того, планетарный мультипликатор не сможет передавать необходимый крутящий момент из-за наличия таких неудачных (по прочностным соображениям) элементов, как зубцы шестерен.

Советским инженером М.А. Капелюшниковым впервые в мире (1925 г.) был предложен забойный редуктор – механическая передача, предназначенная для понижения частоты вращения ведомого вала, который предназначался для работы с турбобуром. В 1930 г. маслonaполненный редукторный электробур сконструировал Г.З. Налбандов. В предвоенные годы вопросами создания и совершенствования редукторных забойных машин занимались также Г.А. Любимов, Е.Г. Старцев, Н.В. Зорин, Н.К. Архангельский, А.П. Островский, Н.В. Александров, Н.Г. Григорян, А.Л. Ильский и др. [3].

Вопросами забойных редукторов занимались и зарубежные ученые. Известны, например, патенты Ф. Витла. Предпринимались попытки использовать в забойных редукторах различные передачи: зубчатые, цилиндрические, конические, прямозубые и косозубые, эвольвентные и М.Л. Новикова, планетарные и с

рядовым соединением зубчатых колес, зубчатые типа внецентроидного цевочного гипоциклоидального зацепления, зубчатые типа волновой, подшипниковые.

На базе зубчатых передач до серийного производства удалось довести только одно изделие – редукторную вставку к электробурю диаметром 190 мм (передаточное отношение – 3, зацепление – эвольвентное, передача – планетарная по схеме 2К-Н).

Отрицательный результат дала попытка создания редукторных вставок меньших диаметров.

С 1975 г. специальное конструкторско-технологическое бюро погружного электрооборудования (г. Харьков), Могилевский машиностроительный институт и ВНИИБТ начало совместные научно-исследовательские, проектно-конструкторские и опытно-промышленные работы по созданию редукторных вставок с принципиально новыми редуцирующими узлами – синусошариковыми [6].

На основании проведенных работ были созданы синусошариковые редукторные вставки, принятые к серийному производству: 1982 г. – РСШ-127-5; 1983 г. – РСШ-190-1,75; и РСШ-190-2; 1986 г. – РСШ-190-5. В обозначениях принято: Р – редуктор-вставка (вставка между электродвигателем и шпинделем), С – синусная, Ш – шариковая; 127 и 190 – значения диаметра (мм), 1,75, 2 и 5 – передаточные числа (отношение частоты вращения ротора к частоте вращения долота).

В Иркутском отделении ВИТР при проведении НИОКТР по созданию конструкции забойного мультипликатора для высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра [17] первоначально была исследована волновая передача [4, 19], которая по сравнению с планетарной имеет ряд преимуществ:

- симметричность конструкции и, как следствие, малые нагрузки на валы и опоры;
- широкий диапазон нагрузок;
- высокая долговечность;
- значительно меньшие габариты по сравнению с планетарной передачей при одинаковом крутящем моменте на тихоходном валу.

Для расчета волновой передачи разработана специальная программа, с помощью которой был спроектирован и изготовлен экспериментальный образец устройства с волновой передачей для экспериментальных исследований.

На Иркутском авиазаводе был изготовлен экспериментальный образец волновой передачи диаметром 73 мм, который проходил испытания на буровых стендах Иркутского отделения ВИТР и ИУПТОКе ПГО «Сосновгеология».

На рис. 3 показаны детали волновой передачи, а на рис. 4 – экспериментальный образец устройства с волновой передачей, которое было испытано в стендовых условиях Иркутского отделения ВИТР. При частоте вращения тихоходного вала 24 мин^{-1} (быстроходного

В. И. СКАЯНОВ
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ
МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
И ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКОБОРОТНОГО АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА
БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

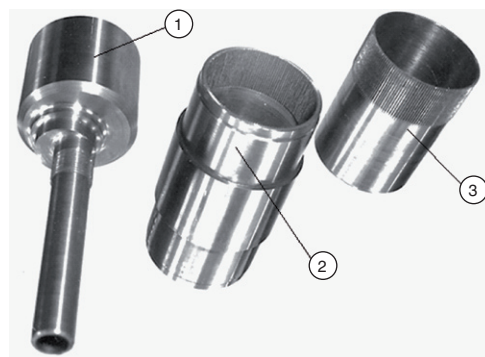


Рис. 3.

Детали волновой передачи: 1 – генератор волн; 2 – венцовая шестерня; 3 – гибкая шестерня

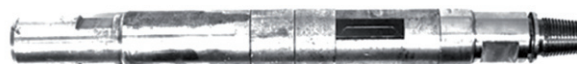


Рис. 4.

Экспериментальное устройство с волновой передачей диаметром 73 мм

соответственно 1920 мин^{-1}) произошла поломка гибкой шестерни, т.е. появилась трещина между зубьями шестерни.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований выявлены следующие недостатки волновой передачи, затрудняющие ее использование в качестве забойного мультипликатора:

- высокое значение нижнего предела передаточных отношений для стальных гибких колес 1:30;
- сложность и высокая точность изготовления гибкого колеса, что затрудняет ремонтные работы;
- высокие требования по условиям эксплуатации.

В результате дальнейших исследований автор обратил внимание на принципиально новые устройства – синусошариковые передачи [5] с промежуточными звеньями и соосным расположением валов (рис. 5).

От подшипниковых (шариковых, фрикционных) эти передачи отличаются существенно большей несущей способностью, устойчивостью передаточного отношения и более высоким КПД. Они проще зубчатых планетарных механизмов и перекрывают диапазон передаточных чисел, недостижимых для волновых передач.

Синусошариковая механическая передача может работать не только в режиме редуктора (понижения частоты вращения ведомого вала), но и в режиме мультипликатора (повышения частоты вращения ведомого вала) (рис. 6), поэтому дальнейшие исследования посвящены созданию устройства для высокооборотного бурения скважин малого диаметра.

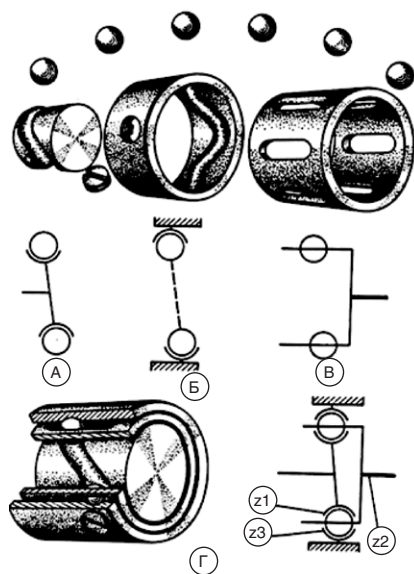


РИС. 5.

Вариант двухсинусоцилиндрической шариковой передачи, принятый для применения в забойном мультипликаторе: А – ведущий вал (z1); Б – корпус (z2); В – водило (z3); Г – передача в сборе и ее кинематическая схема

Системный подход к анализу известных теоретических исследований и производственных данных позволил обобщить, систематизировать и классифицировать методы передачи и преобразования механической энергии в скважине для высокооборотного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра с учетом достоинств и недостатков каждого способа (рис. 7) и выбрать наиболее эффективный в определенных геолого-технических условиях метод разработки оригинальных (новых) конструкций скважинных преобразователей для его реализации [11].

Для выполнения технологических операций при колонковом высокооборотном алмазном бурении глубоких геологоразведочных скважин наиболее эффективным будет метод роторного бурения с применением забойного ускорителя – роторно-мультипликаторного бура (РМБ) [2, 8], в котором в качестве мультипликатора предложена многорядная механическая двухсинусоцилиндрическая (синусошариковая) передача (рис. 8). По своим техническим характеристикам РМБ способен кратно увеличить частоту вращения колонкового набора с алмазной коронкой в сравнении с частотой вращения буровой колонны [10, 12].

Метод бурения с РМБ имеет следующие достоинства:

1. Не нужен большой перепад давления промывочной жидкости (например, для работы ВЗД необходим 9 и более МПа).
2. Может передавать в скважине малого диаметра

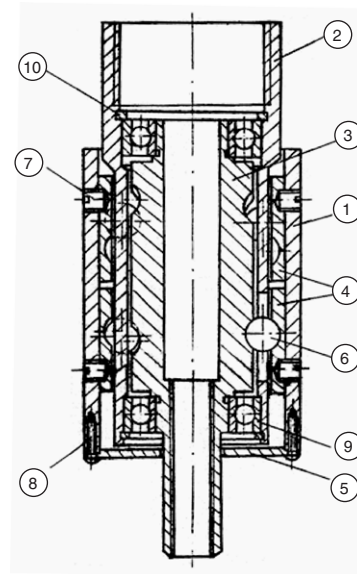


РИС. 6.

Экспериментальный образец синусошарикового мультипликатора: 1 – корпус; 2 – ведущий вал-сепаратор; 3 – ведомый вал; 4 – втулка охватывающая; 5 – крышка; 6 – шарик; 7 – винт; 8 – винт; 9 – подшипник; 10 – кольцо

крутящий момент более высокий, чем ГЗД и электробур [14] за счет одновременного зацепления всех шариков, в отличие от зубчатого, а также за счет повышения рядности, что трудно достичь при использовании зубчатых передач.

3. Возможность регулирования в широких пределах параметров режима бурения и промывки, параметров очистного агента, давления в нагнетательной линии, бурения на депрессии.

4. За счет контакта башмаков тормозного механизма РМБ о стенки скважины при бурении достигается центрация колонковой трубы при бурении, исключаются ее продольные, поперечные и торсионные вибрации, что увеличивает ресурс бурового и породоразрушающего инструмента, снижает избирательное разрушение керна, повышает процент выхода керна [9].

5. КПД при проведении испытаний экспериментального образца диаметром 73 мм был равен 0,86–0,9, тогда как у ГЗД КПД равен 0,3–0,7, электробур – 0,6–0,75.

6. Межремонтный период РМБ не имеет такого важного значения, как в ГЗД и электробуре, т.к. съемный цилиндрический синусошариковый мультипликатор РМБ периодически поднимается на поверхность вместе с керноприемником и есть возможность поменять его на заранее подготовленный (прошедший осмотр и техническое обслуживание с заменой изношенных деталей).

Экспериментальные исследования КПД макетного образца цилиндрического синусошарикового мульт-

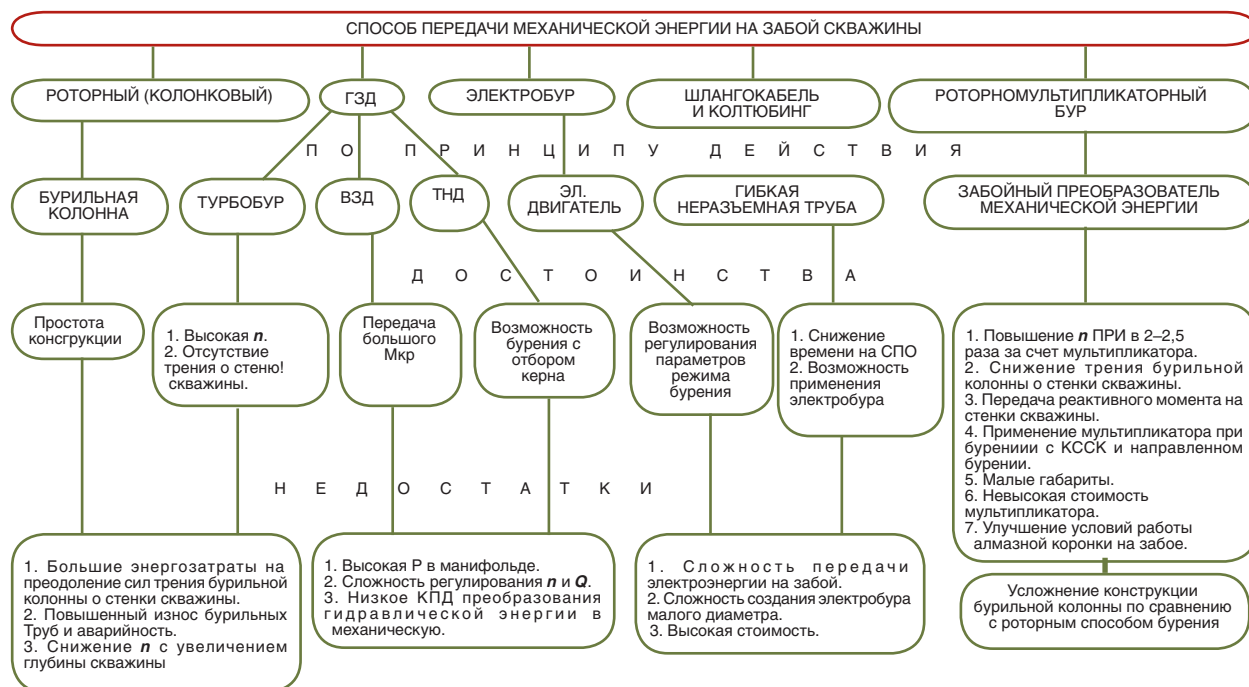


РИС. 7.

Классификация способов передачи и преобразования параметров механической энергии на забой геологоразведочной скважины, их достоинств и недостатков

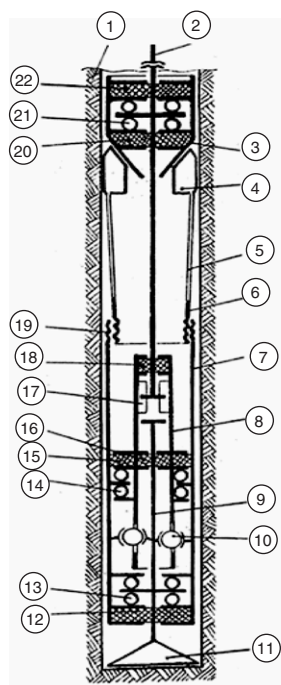


РИС. 8.

Схема РМБ, находящегося в скважине:

1 – скважина; 2 – бурильная труба; 3; 4; 5; 6 – детали тормозного механизма; 7; 8; 9; 10 – детали СШМ; 11 – алмазная коронка; 12; 15; 16; 18; 20; 22 – уплотнения; 13; 14; 21 – подшипники; 17 – шлицевое соединение; 19 – резьбовое соединение

типликатора РМБ диаметром 73 мм (рис. 9, 10) были проведены в стендовых условиях (рис. 11). Результаты испытаний мультипликатора с передаточным отношением $i = 2,33$ приведены в таблице 2, по которым была получена зависимость КПД мультипликатора от величины передаваемого крутящего момента (рис. 12). Из нее следует, что с увеличением значений передаваемого крутящего момента повышается КПД мультипликатора. Это объясняется тем, что если в начальный период испытаний при минимальном крутящем моменте на ведущем валу СШП шарик соприкасается с беговыми дорожками в точках из-за погрешностей изготовления деталей, то при повышении крутящего момента эти контакты становятся более линейными (по дугам окружностей). Повышение КПД происходит вследствие упругой деформации металла в нагруженных точках и явления прирабатываемости [13, 14].

1. Средняя арифметическая представительна, поскольку коэффициент вариации не превышает 6%.
2. Влияние смазочного материала на величину КПД вполне достоверно.

КПД мультипликатора η вычислялся по формуле:

$$\eta = M_1 / (M_2 + M_3) \cdot i,$$

M_1 – крутящий момент на ведущем валу (бурильная колонна); M_2 – крутящий момент на ведомом валу (ко-



Рис. 9.
Детали мультипликатора

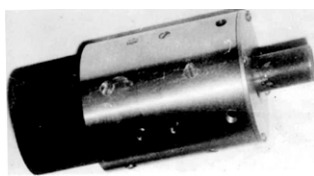


Рис. 10.
Мультипликатор в сборе

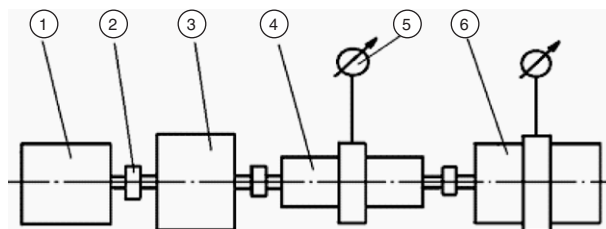


Рис. 11.
Стенд для исследования КПД мультипликатора: 1 – приводной двигатель; 2 – полужесткая муфта; 3 – коробка передач; 4 – синусошариковый мультипликатор; 5 – динамометр с рычагом и деталями крепления к корпусам мультипликатора и двигателя-нагрузителя; 6 – двигатель-нагрузитель

ТАБЛИЦА 2.

Результаты испытаний синусошарикового мультипликатора с передаточным отношением $i = 2,33$ в стендовых условиях

№ эксперимента	Крутящий момент на корпусе, Н·м		Числовые характеристики выборки значений КПД		
	Мультипликатор, М1	Нагрузочный двигатель, М ₃	η	x	$V, \%$
Смазочный материал «Графитол»					
1	6	12	4	0,77	5,58
2	7	11	6	0,78	5,51
3	8	15	5	0,81	5,43
4	9	17	4	0,82	5,24
5	10	19	6	0,81	5,43
6	11	21	6	0,80	5,46
Смазочный материал «ТАД-17»					
1	6	10	5	0,86	5,30
2	7	11,5	5	0,87	5,23
3	8	13	6	0,88	5,20
4	9	14,5	7	0,89	5,18
5	10	16	7	0,90	5,15

лонковый набор); M_3 – реактивный момент на промежуточном валу (водило мультипликатора, заторможено); i – передаточное отношение мультипликатора (для испытуемого образца $i = 2,33$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных стендовых исследований были решены следующие задачи:

- проверена работоспособность и практическая приемлемость синусошариковой передачи для ее работы в режиме мультипликатора;
- найдены принципиальные конструкторско-технологические решения для создания многорядного синусошарикового мультипликаторного узла диаметром 73 мм (обеспечивающих сборку при сохранении конструкторской и технологической простоты устройства);
- обоснована перспективность создания промышленно работоспособной конструкции РМБ.

Оснащение мультипликатора РМБ съемными элементами позволит извлекать мультипликатор на поверхность вместе со съемным керноприемником, а механизм фиксации реактивного момента о стенки

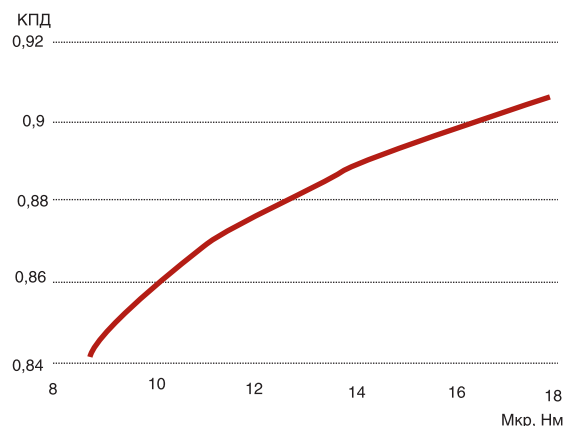


Рис. 12.

Зависимость КПД синусошарикового мультипликатора от передаваемого крутящего момента

скважины при этом будет оставаться на своем месте встроенным между бурильной колонной и верхней частью колонкового набора и пропускать через себя съемный керноприемник при проведении СПО.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проведении НИОКТР по созданию забойных устройств для высокочастотного алмазного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра, позволяющих повысить экономическую эффективность бурения, геологическую информативность и представительность опробования по керну, снизить энергоемкость и металлоемкость бурового оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 866090, СССР. Устройство для бурения скважин, 1981.
2. А.с. № 2004118896/03, E21B4/20, 22.04.2004 Роторно-мультипликаторный бур.
3. ВАДЕЦКИЙ Ю.В., ИГНАТИШЕВ Р.М., МАКАРЕВИЧ Д.М. и др. Забойные синусошариковые редукторные вставки, применяемые в бурении скважин. М.: ВНИИОЭНГ. 1988. Вып. 1.
4. ИВАНОВ М.Н. и др. Волновые передачи (Рекомендации по инженерным расчетам). М.: ВНИИТЭМР, 1986.
5. ИГНАТИШЕВ Р.М. Общие сведения о синусошариковых передачах // Вестник машиностроения. 1986. №2. С. 24–28.
6. ИГНАТИШЕВ Р.М., ГРЕБЕНЬ А.М., РЕЗНИКОВ В.Д. и др. А.с. 960412, СССР. Синусошариковый редуктор для забойных двигателей // Бюл. № 35, 1982.
7. ИГНАТОВ С.Н., АТАМАНОВ В.Ф., САГИНОВ В.А. и др. Алмазно-планетарный бур / Механизация очистных и подготовительных работ. Ч. 1, Караганда, изд. КПТИ, 1969. С. 173–177.
8. НЕСКОРОМНЫХ В.В., ПОПОВА М.С., ПЕТЕНЕВ П.Г. и др. Современные технологии бурения на твердые полезные ископаемые: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 340 с.
9. Отраслевая методика по разработке и совершенствованию технологии бурения на твердые полезные ископаемые. Изд. 2-е перераб. И доп. Сост. Васильев В.И., Пономарев П.П., Блинов Г.А., Бакланов Ю.В., Кулик Б. А., Лаврова Б.А, Оношко Ю.А. Л.: ВИТР, 1983. 130 с.
10. СКАЛЯНОВ В.И. Обоснование параметров новых технических средств для повышения эффективности высокооборотного алмазного бурения глубоких геологоразведочных скважин. Дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. М.: РГГРУ. 2007.
11. СКАЛЯНОВ В.И. Научный подход к передаче и преобразованию механической энергии для повышения эффективности высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах геологоразведочных скважин // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». 2024. № 4.
12. СКАЛЯНОВ В.И., ЯКУНИН А.Б., ВОРОНОВА А.К. и др. Разработать забойный мультипликатор для повышения эффективности алмазного бурения. От-

В.И. СКАЛЯНОВ
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ
МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
И ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКОБОРОТНОГО АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА
БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

чет № 01890067304. Иркутск: Иркутское отделение ВИТР, 1989. 97 с.

13. ИГНАТИШЕВ Р.М., КРЕЗ А.И., ГРОМЫКО П.Н., СКАЛЯНОВ В.И. и др. Создание научного задела под прикладные исследования и опытно-конструкторские работы роторно-мультипликаторного бура диаметром 73 мм, работающего в режиме повышения частоты вращения в 2,0–2,5 раза. Отчет ВТК «Синус-4» на базе Могилевского машиностроительного института, Могилев, 1990. 50 с.
14. ИГНАТИШЕВ Р.М., НИКОЛАЕВ Л.А., КРЕЗ А.И., СКАЛЯНОВ В.И. и др. Исследования и конструкторско-технологические проработки синусошариковой передачи для использования в забойных устройствах. Отчет ВТК «Синус-3» на базе Могилевского машиностроительного института, Могилев. 1989. 27с.
15. КАЛИНИН А.Г., ВЛАСЮК В.И., ОШКОРДИН О.В., СКРЯБИН Р.М. Технология бурения разведочных скважин. М.: Изд-во «Техника», ТУМА ГРУПП. 2004. 528 с.
16. НЕСКОРОМНЫХ В.В. Н552 Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2012. 294 с.
17. СКАЛЯНОВ В.И., ЯКУНИН А.Б., ВОРОНОВА А.К. и др. Разработать забойный мультипликатор для повышения эффективности алмазного бурения. Отчет № 01890067304. Иркутское отделение ВИТР. 1989. 97 с.
18. Справочник по бурению геологоразведочных скважин. СПб.: ООО «Недра», 2000. 712 с.
19. ШУВАЛОВ С.А. Методические указания по расчету волновых зубчатых передач на ЭВМ. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1987.

REFERENCES

1. A.s. 866090, USSR. Well drilling device, 1981. (In Russian).
2. A.s. N 2004118896/03, E21B4/20, 22.04.2004 Rotary multiplier drill. (In Russian).
3. VADETSKY YU.V., IGNATISHCHEV R.M., MAKAREVICH D.M. ET AL. Downhole sine-ball gear inserts used in well drilling. Moscow: VNIIOENG, 1988;1. (In Russian).
4. IVANOV M.N. ET AL. Wave transmissions (Recommendations for engineering calculations). Moscow: VNIITEMR, 1986. (In Russian).
5. IGNATISHCHEV R.M. General information on sine-ball transmissions. *Vestnik mashinostroyeniya*. 1986;2:24–28. (In Russian).
6. IGNATISHCHEV R.M., GREBEN A.M., REZNIKOV V.D. ET AL. A. s. 960412, USSR. Sine-ball gearbox for downhole motors. *Bulletin N 35*, 1982. (In Russian).
7. IGNATOV S.N., ATAMANOV V.F., SAGINOV V.A.

- ET AL. Diamond-planetary drill. Mechanization of cleaning and preparatory works. Part 1, Karaganda, KPTI Publishing House, 1969:173–177. (In Russian).
8. NESKOROMNYKH V.V., POPOVA M.S., PETENEV P.G. ET AL. Modern drilling technologies for solid minerals: textbook. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t. 2020:340. (In Russian).
9. Industry methodology for the development and improvement of drilling technology for solid minerals. 2nd ed. revised and enlarged. Comp. Vasiliev V.I., Ponomarev P.P., Blinov G.A., Baklanov Yu.V., Kulik B.A., Lavrova B.A., Onoshko Yu.A. Leningrad: VITR, 1983:130. (In Russian).
10. SKLYANOV V.I. Justification of the parameters of new technical means for increasing the efficiency of high-speed diamond drilling of deep exploration wells. Diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: RGGRU. 2007. (In Russian).
11. SKLYANOV V.I. A scientific approach to the transmission and conversion of mechanical energy to improve the efficiency of high-speed diamond drilling at great depths in geological exploration wells. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Inzhener-neftyanik»*. 2024;4. (In Russian).
12. SKLYANOV V.I., YAKUNIN L.B., VORONOVA L.K. ET AL. Develop a downhole multiplier to improve the efficiency of diamond drilling. Report N 01890067304. Irkutsk: Irkutskoye otделение VITR. 1989:97. (In Russian).
13. IGNATISHCHEV R.M., KREZ A.I., GROMIKO P.N., SKLYANOV V.I. ET AL. Creating a scientific basis for applied research and development work on a rotary multiplier drill with a diameter of 73 mm, operating in a mode of increasing the rotation speed by 2.0–2.5 times. Report of the VTK "Sinus-4" based on the Mogilev Machine-Building Institute, Mogilev, 1990:50. (In Russian).
14. IGNATISHCHEV R.M., NIKOLAEV L.A., KREZ A.I., SKLYANOV V.I. ET AL. Research and design-technological development of a sine-ball gear for use in downhole devices. Report of the VTK "Sinus-3" based on the Mogilev Machine-Building Institute, Mogilev. 1989:27. (In Russian).
15. KALININ A.G., VLASYUK V.I., OSHKORDIN O.V., SKRYABIN R.M. Technology of drilling exploratory wells. Moscow: Izd-vo «Tekhnika», TUMA GRUPP. 2004:528. (In Russian).
16. NESKOROMNYKH V.V. N552 Well Design for Solid Minerals: A Tutorial. Krasnoyarsk: SFU, 2012. 294. (In Russian).
17. SKLYANOV V.I., YAKUNIN L.B., VORONOVA L.K. ET AL. Developing a Downhole Multiplier to Increase the Efficiency of Diamond Drilling. Report N 01890067304. Irkutsk Branch of the Institute of Hydrodynamics and Technical Sciences. 1989:97. (In Russian).
18. Handbook of Exploration Well Drilling. St. Petersburg: Nedra LLC, 2000:712. (In Russian).
19. SHUVALOV S.A. Guidelines for calculating wave gear transmissions on a computer. Moscow: MVTU im. N.E. Bauman. 1987. (In Russian).

Склянов Владимир Иванович,
 к.т.н, доцент кафедры современных технологий бурения
 скважин Российского государственного геологоразведочно-
 го университета имени Серго Орджоникидзе

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ,
 117485, 23, Moscow, Miklukho-Maklaya str.
 тел.: +7 (916) 998-22-32, e-mail: sklianovvi@mgri.ru