



УДК 539.3

ЭЛЕКТРОБУР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**ELECTRIC DRILL OF NEW GENERATION****Деркач Николай Дмитриевич**

кандидат технических наук,
генеральный конструктор ЗАО «НГТ»
nikolaiderkach@gmail.com

Пестренин Валерий Михайлович

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры механики сплошных сред
и вычислительных технологий,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
Pestreninvm@mail.ru

Пестренина Ирина Владимировна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры механики сплошных сред
и вычислительных технологий,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
IPestrenina@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены преимущества электробура и недостатки существующих конструкций, показана актуальность применения электробуров с учетом особенностей ресурсной базы для добычи нефти в России наших дней. Представлен уровень современных достижений в области погружных электродвигателей (ПЭД), редукторов забойных двигателей, систем управления траекторией скважины, обозначены проблемы, возникающие при адаптации существующих технических решений к условиям динамических нагрузок в процессе бурения. Намечены направления исследований динамики бурильной колонны, включающей токоподвод, ПЭД, редуктор, блок управления траекторией, шпиндель и систему телеметрии. Проводится оценка динамического поведения бурильной колонны с электробуром с использованием балочной конечно-элементной модели.

Ключевые слова: электробур, преимущества электробурения, недостатки электробурения, погружной электродвигатель (ПЭД), редуктор, шпиндель, механизм искривления, система управления траекторией скважины, телеметрия, балочная конечно-элементная модель.

Derkach Nikolay Dmitrievich

Candidate of Technical Sciences,
Chief Designer JSC NGT
nikolaiderkach@gmail.com

Pestrenin Valery Mihaylovich

Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of department of
continuum mechanics and computing
technologies,
Perm State National Research University
Pestreninvm@mail.ru

Pestrenina Irina Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of department of
continuum mechanics and computing
technologies,
Perm State National Research University
IPestrenina@gmail.com

Annotation. The electric drill advantages and the existing constructions weaknesses are considered. The urgency of the electric drills application taking into account the resource base features for oil production in Russia today is shown. The modern achievements level in the field of submersible electric motors (SEM), downhole motor reducers, well trajectory control systems is presented. Problems arising when adapting existing technical solutions to the conditions of dynamic loads during drilling are indicated.

Research directions of the drill string dynamics including current supply system, SEM, reducer, trajectory control unit, spindle and telemetry system are outlined. It is realized the dynamic behavior estimation on the beam finite element model base for a drill string, included an electric drill.

Keywords: electric drill, advantages of electric drilling, disadvantages of electric drilling, submersible electric motor (SEM), reducer, spindle, curvature mechanism, well trajectory control system, telemetry, beam finite element model, amplitude-frequency characteristic.

Введение

Зависимость Российского ТЭКа от западных технологий на пике достигала 80 %, а Россия в лице национальных компаний получала прибыль в основном за счет продажи сырья [1]. Для возвращения к Российскому инжинирингу на уровне государственной политики была провозглашена программа импортозамещения, которая приносит свои плоды. Но догонять всегда сложно – конкуренты редко стоят на месте. Поэтому более популярной становится программа импортоопережения. Проект «Электробур нового поколения» относится к такой программе.

Первые патенты на электробуры были выданы в конце XIX века [2–3]. С использованием бурильных труб первая в мире скважина была пробурена в 1940 году электробуром, созданным А.А. Островским и Н.В. Александровым [3]. Промышленное производство электробуров осуществлялось на Харьковском электро-механическом заводе с 1965 г., а с 1972 г. было передано Харьковскому заводу «Потенциал».



Наиболее широко электробур использовался при бурении скважин в Башкортостане, Туркменистане, Азербайджане, Украине. Только в Башкортостане было пробурено более 2500 скважин, а общий объем бурения составил более 12,5 млн м [4].

Преимущества

Самое большое преимущество электробура – наличие токоподвода. Это надежный канал для бесперебойной передачи информации от погружной телеметрической аппаратуры с забоя скважины на поверхность в режиме on-line, что позволяет с минимальной погрешностью осуществлять проводку заданной траектории скважины. Особенно эффективно электробурение при бурении горизонтальных, разветвлено-горизонтальных скважин (с большим положением горизонтального участка), а также при проходке дополнительных горизонтальных стволов в ранее пробуренных скважинах [4]. Есть еще ряд преимуществ:

- при бурении электробуром гидравлическая мощность буровых насосов полностью используется для улучшения очистки забоя, что в конечном счете приводит к повышению механической скорости и проходки на долото;
- бурение электробуром ведется при значительно меньших давлениях на насосах (примерно на 60–90 кг/см²), а значит этим типом оборудования можно бурить более глубокие (протяженные) скважины;
- изменение момента сопротивления на долоте мгновенно влияет на изменение силы тока и активной мощности, которые контролируются на поверхности. В результате появляется возможность (без подъема колонны бурительных труб) своевременно определить степень износа долота, предотвратить аварийные ситуации, определять с большой точностью смену проходимых пород, а самое главное – открываются широкие возможности для автоматизации процесса бурения скважины;
- статические и динамические характеристики двигателя электробура не зависят от его положения в пространстве и глубины, на которой он находится; это позволяет передавать большую мощность на большие глубины и в очень искривленной скважине [4];
- мощность электробура не зависит от типа промывочной жидкости, удельного веса, тампонажных наполнителей, в чем электробур существенно превосходит гидравлические забойные двигатели;
- самое главное – электробур может применяться при бурении на депрессии: при аэрации бурового раствора происходит как заметное уменьшение мощности объемного гидропривода (ВЗД), так и изменение его характеристики в худшую сторону; применение ВЗД становится весьма проблематичным, а информация, передаваемая по гидроканалу, в значительной степени искажается;
- появление режимов работы долота с подклинкой (заклинкой) не предсказуемо, но при бурении электробуром есть возможность мгновенно изменять частоту вращения долота и даже переходить на обратное вращение, что в принципе может существенно увеличить наработку долота и исключить аварийность, связанную с заклинкой долота.

Недостатки

В сравнении с гидравлическими забойными двигателями конструкция электробура значительно сложнее, тем не менее ремонт электробуров происходит в основном путем замены торцовых уплотнений и подшипников и происходит в два раза быстрее, чем ремонт гидравлических двигателей [4];

- наличие большого количества электрических соединений в токоподводе – необходимо существенное упрощение конструкции соединений и повышение надежности их работы;
- увеличение времени на свинчивание бурительных труб с кабельным токоподводом при их наращивании и проведении спуско-подъемных операций;
- размещение кабеля в центральной части внутренней полости бурительной трубы в ряде случаев затрудняет (или исключает) проведение определенных видов работ (например, спуск торпеды при ликвидации прихвата бурительной колонны). Необходимо исключить такой тип размещения кабеля.

Особенности конструкции

Конструкция электробура состоит из маслonaполненного электродвигателя и соединенных с ним редуктора и шпинделя. Электродвигатель и редуктор/шпиндель оснащены автономными системами маслозащиты, так как в электродвигателе используется трансформаторное масло с высокими диэлектрическими параметрами, а полость редуктора/шпинделя заполняется обычно авиационным маслом (МС-20; МК-22) или другим аналогичным маслом.

Для бурения разветвлено-горизонтальных скважин применяют механизмы искривления с помощью которых в месте присоединения шпинделя к электродвигателю электробур искривляется на 1°; 1,5° и 2°. Механизм искривления монтируют между электродвигателем и шпинделем.

Для контроля за траекторией скважины используется забойная телеметрическая система, которая передает в режиме on-line информацию об угле наклона скважины, азимуте и положению отклонителя с учетом угла закручивания колонны бурительных труб от реактивного момента электробура.



Для уменьшения скорости вращения долота и повышения крутящего момента применяют редукторы-вставки, которые так же, как и механизм искривления, монтируются между двигателем и шпинделем [4]. Эта устоявшаяся компоновка электробура и принята за основу конструкции электробура нового поколения.

Актуальность разработки электробура нового поколения

Состояние ресурсной базы России и особенности развития буровых работ на нефть – один из ключевых вопросов в оценке актуальности разработки электробура нового поколения. Что мы имеем на данный период в этих вопросах:

1) более 70 % добычи в России обеспечиваются месторождениями с уровнем выработки около 80 % (Западная Сибирь, Волго-Уральский регион), а значительная доля запасов в РФ составляют трудноизвлекаемые;

2) новые регионы нефтедобычи (Восточная Сибирь и Дальний Восток) обеспечивают положительный прирост добычи нефти, но в среднесрочной перспективе (2018–2024 гг.) потенциала данных регионов не хватит, чтобы компенсировать падение добычи в старых районах (Западная Сибирь, Волго-Уральский регион), поэтому в этих регионах наращивают и будут наращивать эксплуатационное бурение;

3) наклонно-направленное бурение становится все менее эффективным, уступая все большую долю горизонтальному бурению, что повышает спрос на сервис MWD и LWD, причем около 75 % роста горизонтального бурения происходит в старых районах;

4) еще одно направление развития буровых работ в России, требующих обязательного использования MWD – зарезка боковых стволов (ЗБС) из простаивающих или низкодебитовых скважин.

Анализ имеющихся данных показывает, что рынок буровых работ, требующих высокоточного выполнения проектных профилей скважин: горизонтальное бурение, включая бурение скважин с большим проложением от вертикали (БОВ), боковых стволов (БС), боковых стволов с горизонтальным проложением (БГС), многозабойных скважин (МЗС), многоствольных скважин (МСС) постоянно растет. Это рынок, который требует использования высокотехнологичного оборудования. Это и есть рынок электробурения. Почему электробурения? Потому что длительный период промышленного применения электробуров (в СССР и в России) показал, что телеметрическая система, разработанная для электробура, по своим оперативным возможностям лучше зарубежных аналогов (использующих гидравлический канал связи с забоем), а по стоимости дешевле в несколько десятков раз [5].

Естественно, что в последние годы (в силу ряда причин) серьезных работ по совершенствованию электробуров на ОАО «Потенциал» (г. Харьков) не проводилось (отсутствие заказов, отсутствие средств). В России же в последние годы в области погружных электродвигателей (ПЭД) достигнут большой прогресс. В последние 5–7 лет АО «Новомет-Пермь» в новых конструкциях ПЭД осуществил переход на вентильные электродвигатели, которые в сочетании с высокоэффективными ступенями центробежных насосов позволили создать более прогрессивные конструкции с высоким уровнем энергосбережения. Энергоэффективные УЭЦН – установки нового поколения для подъема пластовой жидкости – позволяют снизить себестоимость добытой нефти за счет снижения затрат электроэнергии на 20–30 % при сохранении конструктивной надежности на уровне серийно поставляемого оборудования либо превышать его [6]. Значительно увеличен ресурс непрерывной работы в скважине: в отдельных случаях АО «Новомет-Пермь» дает гарантию до 3–4 лет. Это очень высокие показатели для оборудования, работающего в скважине.

Управление траекторией скважины

Большой прогресс достигнут и в области устройств по управлению траекторией скважины. В этих вопросах наибольший успех получен в роторных управляемых системах (РУС). Мировые лидеры в области разработки и производства РУС: Baker Hughes, Schlumberger, Halliburton, Weatherford и именно эти компании предоставляют в России полный объем высокотехнологичных услуг РУС+MWD/LWD. Имеют свои собственные разработки РУС и осуществляют их производство еще более дюжины Западных компаний (в т.ч. Aps Technology, Gyrodata, National Oilwell Varco, Scientific Drilling, Smart Drilling, Double Barrel RSS, Terravici Drilling Solutions, Renhe Group, BHDC, TIANJIN, ZPEC и др.). В последнее время упомянутые компании интенсивно работают над следующей версией РУС-РУС+ВЗД. В России в области РУС на уровне НИОКР и ОКР проводят работы концерн «Электроприбор», НПП «Буринтех», «Тюменская буровая компания», «Пермская компания нефтяного машиностроения» (ПКНМ), ГК «Интегра», ЗАО «НГТ» и др. Столь пристальное внимание к РУС свидетельствует о большой перспективности этого типа забойного инструмента – это практически новая эра в строительстве нефтяных и газовых скважин. Анализ нашего опыта и существующего уровня зарубежных разработок показал следующее:

Из двух схем механизмов, применяемых для управления траекторией скважин, «Point the bit» и «Push the bit» предпочтительна последняя.



Конструкции РУС, использующих схему «Push the bit» и масло для толкания поршней, не надежны (вследствие непредсказуемого износа уплотняющих элементов).

Выдвижные лопатки (лапы) подвержены интенсивному износу (необходимо применять достаточно дорогие и очень трудоемкие в обработке материалы) и есть риск, что лопатки (лапы) могут остаться на забое.

Для получения требуемого темпа набора кривизны отклоняющий блок надо максимально приблизить к долоту.

Редуктор и маслозащита

Следующий весьма важный вопрос для надежной работы электробура – редуктор. Но мы его рассмотрим совместно с решением очень важной проблемы адаптации ПЭД с вентильным электродвигателем, его системы маслозащиты, возможных вариантов токоподвода для работы в условиях динамических нагрузок, возникающих в процессе бурения. Именно этот вопрос был самым сложным при создании промышленной конструкции редукторного турбобура. Эта работа была проведена в Пермском филиале ВНИИБТ в содружестве с Пермским государственным университетом.

Созданию промышленной конструкции редукторного турбобура предшествовал цикл исследовательских работ в области динамики забойного двигателя и гидродинамики маслозащиты. Были решены общетехнические вопросы учета влияния крутильных, продольных и поперечных колебаний турбобура с редуктором на работоспособность конструкции.

Работа турбобура на забое скважины характеризуется значительными динамическими нагрузками, возникающими вследствие продольных, крутильных и поперечных колебаний нижней части бурильной колонны. С ростом глубины скважины эти процессы становятся практически неуправляемыми. В этих условиях проблема динамики и гидродинамики приобретают первостепенное значение. В целях обеспечения высокой эксплуатационной надежности редуктора и системы маслозащиты возникла необходимость оценки динамических процессов и учета динамических составляющих нагрузок в прочностных расчетах. Динамика редукторного турбобура на первой стадии изучалась на простейшей расчетной модели с сосредоточенными массами. Так как турбобур включал турбинную секцию, редуктор и шпиндель, то это была трехмассовая модель. В последующем была разработана более сложная модель с распределенными массами, с учетом упругости вала, корпуса и планетарного редуктора. Проведенные исследования позволили создать методики расчета и разработать конструкцию планетарного редуктора с устройствами компенсации избыточных деформаций, возникающих при динамических нагрузках.

Математическая модель маслозащиты была разработана с учетом воздействия двух забойных динамических факторов: пульсации давления промывочной жидкости и осевой вибрации. В результате исследований удалось определить оптимальное значение коэффициентов гидроразгрузки верхнего и нижнего торцовых уплотнений, а также оптимизировать параметры лубрикатора и сечений каналов для масла. Эти исследования динамики и гидродинамики были использованы при разработке редукторного турбобура ТРМ-195.

Результаты исследований на математических моделях (трехмассовой и с распределенными параметрами) были проверены при проведении динамических испытаний ТРМ-195 на буровом стенде при бурении гранитного блока, на стальном и свинцовом забоях. А также при бурении экспериментальной скважины на испытательном полигоне Пермского филиала ВНИИБТ на глубине 1700 м с использованием системы телеметрии с кабельной линией связи СТТ-164, применяемой обычно в электробурении.

Математическая модель маслозащиты была проверена в экспериментах с использованием тензометрических датчиков давления путем измерения пульсации давления промывочной жидкости и в масле в зоне верхнего и нижнего уплотнения при работе ТРМ-195 на стальном забое шарошечным долотом.

В последующем при бурении скважин на нефтяных месторождениях Татарии, Башкирии и Западной Сибири была проведена окончательная доработка конструкции редукторного турбобура ТРМ-195. В течение периода 1975–1981 годов ТРМ-195 изготовлялся крупными партиями в количестве 10-50 штук опытным производством ПФ ВНИИБТ и Кунгурским машиностроительным заводом. С 1982 года было начато серийное производство маслonaполненных редукторов РМ-195 и шпинделей турбобура ТРМ-195 на заводе «Тамбовполимермаш».

Описанный выше редукторный турбобур ТРМ-195 мм нашел широкое применение на нефтепромыслах Западной Сибири, Волго-Уральского региона России. Общий объем бурения превысил 3,5 млн метров, ежегодная проходка достигала около 400–600 тыс. м. Маслonaполненный редуктор работал без ремонта более 200 часов, что особенно важно при работе с современными долотами, характеризующимися большим сроком службы.

Термостойкий вариант вышеупомянутого турбобура ТРМ-195 применялся при бурении ряда сверхглубоких скважин (в рамках программы научного континентального бурения), включая самую глубокую в мире Кольскую скважину в интервале 8150–12260 м. Для этой цели потребовалось повысить термостойкость ряда элементов турбобура и редуктора до 250 °С. На рисунке 1 представлен спуск термостойкого (до 250 °С) редукторного турбобура ТРМ-195 до глубины 12237 м (Кольская сверхглубокая скважина).

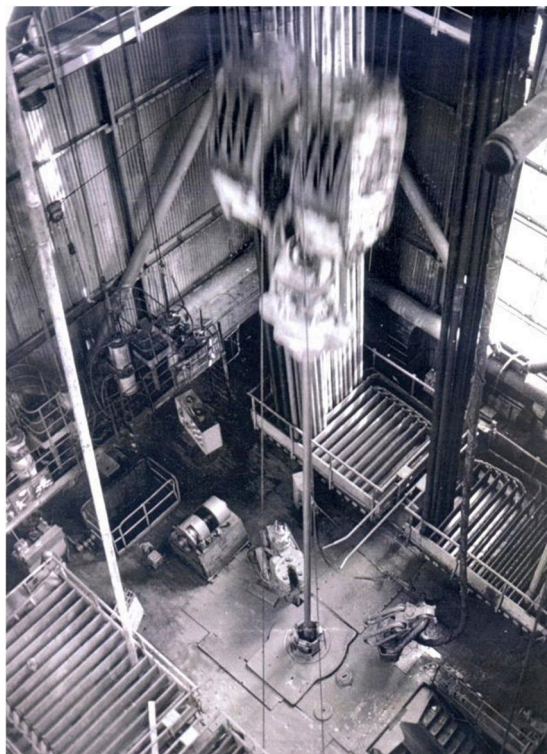


Рисунок 1 – Спуск термостойкого редукторного турбобура ТРМ-195 на Кольской сверхглубокой скважине

Редукторные турбобуры в термостойком исполнении успешно применялись также при бурении нижних интервалов Саатлинской, Тимано-Печерской, Днепрово-Донецкой, Криворожской и Тюменской сверхглубоких скважин. Проводилось бурение с использованием редукторного турбобура и на Уральской сверхглубокой скважине. Всего в сверхглубоких скважинах редукторными турбобурами пробурено более 9000 м. Этот опыт показал их значительное преимущество по сравнению с двигателями ВЗД и безредукторными турбобурами. Прежде всего, это высокая надежность работы в условиях повышенных температур. Так в интервалах глубин от 11200 м до 12260 м наработка на отказ у редуктора-вставки РМ-195 была более 460 часов.

Как видим, имеются хорошие предпосылки для создания электробура нового поколения: надежные конструкции ПЭД («Новомет»), накоплен большой опыт по производству и эксплуатации редукторов, разработана эффективная телеметрическая аппаратура.

Балочная конечно-элементная модель

Компоновка буровой колонны с электробуром (вследствие наличия в ней маслonaполненных элементов и токоподвода) в большей мере должна быть защищена от различных динамических возмущений, чем компоновка с гидравлическими двигателями.

Это обстоятельство обуславливает необходимость изучения динамического поведения такой механической системы как экспериментальными, так и численными методами. Ниже с использованием балочной конечно-элементной модели [8–11] делается оценка динамического поведения компоновки буровой колонны с электробуром в процессе бурения. Расчетная схема изучаемой механической системы представлена на рисунке 2. Ротор и статор электродвигателя, а также редуктор и его корпус нагружены распределенным по длине моментом. Взаимодействие долота с забоем моделируется упругими элементами. Вычисления проведены для компоновок буровой колонны длиной 100 м и 500 м при одинаковом давлении на забой 5 т в статическом состоянии. При этом в обоих случаях напряженное состояние КНБК оказывалось одинаковым, а длина сжатого участка равнялась 90 м. Изучалось влияние общей длины компоновки на ее собственные частоты и динамическая реакция на продольные, крутильные и изгибные возмущения ее конструктивных элементов.

Собственные частоты

Модальный анализ проводился в диапазоне частот $0 \div 70$ Гц. Количество собственных частот в этом диапазоне для 100-метровой компоновки равно 170, для 500-метровой – 575. Таким образом, увеличение общей длины компоновки приводит к росту количества собственных частот рассматриваемой механической системы. Собственные частоты отвечают различным видам колебаний: продольным, крутильным, изгибным, продольно-крутильным, продольно-изгибным, крутильно-изгибным и другим более сложным видам. Взаимосвязь различных видов колебаний компоновки обуславливает отклик системы по характеру движения, не отвечающий виду возмущения.

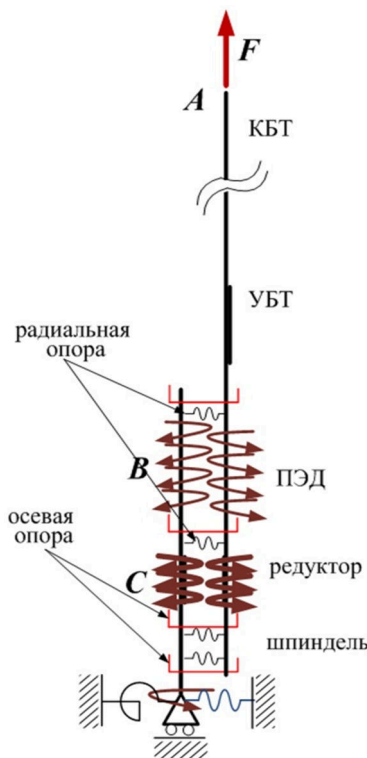


Рисунок 2– Расчетная схема

Реакция компоновки на гармонические возмущения

Рассматриваются следующие гармонические возмущения:

- крутильные возмущения на редукторе, определяемые моментом возмущения $\Delta M_z^p = m \cdot \sin \Omega t$, где m полагалось 1 % от величины действующего момента;
- продольные, прикладываются в точке А (см. рис. 1), гармоническая возмущающая сила $\Delta F_z = d \cdot \sin \Omega t$, амплитуда d задавалась 1 % от F – растягивающего усилия в т. А;
- изгибные, возникающие за счет несоосности ротора в электродвигателе, которая распределена по одной полуволне синусоиды с максимальным значением в среднем сечении 0,1 мм.

Отклик системы на возмущения фиксируется в среднем сечении двигателя В (ротора и статора) и среднем сечении С (редуктора и его корпуса). Рассматриваются поперечные перемещения u_x в этих сечениях, продольные u_z и крутильные с углом φ относительно оси z.

Крутильные гармонические возмущения

Крутильные колебания в компоновке буровой колонны с электробуром могут генерироваться при взаимодействии долота и забоя; вследствие взаимодействия бурового инструмента с буровым раствором; из-за наличия гармонического спектра фазных токов в обмотках статора и ротора, а также из-за наличия вращающихся конструктивных элементов в электробуре и редукторе [12, 13]. На рисунках 3, 4 приводятся расчетные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в сечениях В и С при возбуждении крутильных колебаний в редукторе (случай а).

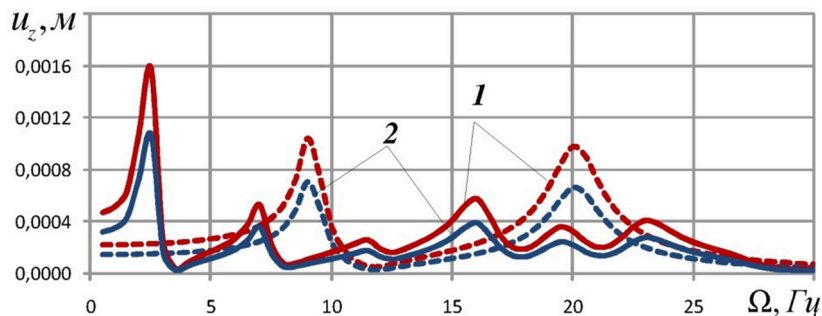


Рисунок 3 – Амплитуды продольных перемещений в зависимости от частоты крутящего момента: сплошные линии – для компоновки с 500 м БТ; штриховые линии для компоновки с 100 м БТ; 1 – сечение электробура в точке В (ротор, статор); 2 – сечение в точке С (редуктор и корпус редуктора)



Из рисунка 3 видно, что диапазон повышенных амплитуд продольных колебаний (независимо от длины БТ) ограничен промежутком $0 \div 30$ Гц. Рост длины буровой колонны приводит к увеличению количества частот с повышенной вибрацией. Продольные колебания в наблюдаемых сечениях происходят синхронно.

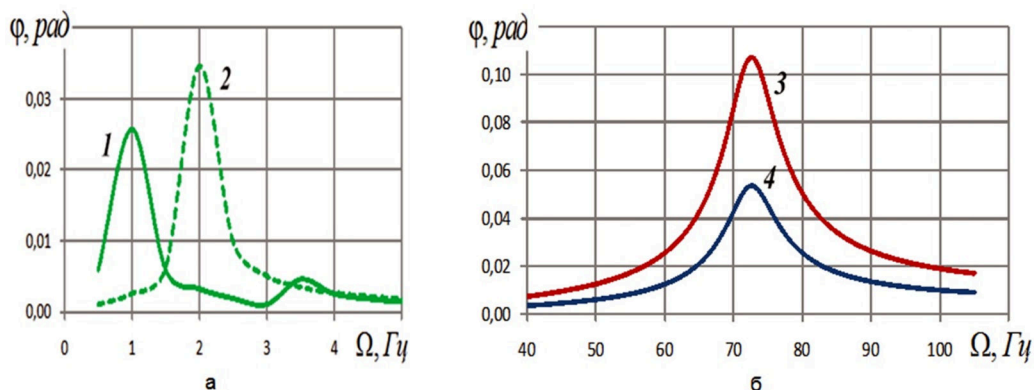


Рисунок 4 – Амплитуды угла закручивания в зависимости от частоты крутящего момента:
 а) статор электродвигателя и корпус редуктора: 1 – для 500м БТ; 2 – для 100м БТ;
 б) ротор электродвигателя (3) для 500 м БТ и 100 м БТ; редуктор (4) для 500 м БТ и 100 м БТ

АЧХ в рассматриваемых сечениях распадаются на два диапазона. В низкочастотном диапазоне (рис. 4а) повышенные вибрации с одинаковой амплитудой испытывают статор электродвигателя и корпус редуктора. В высокочастотном диапазоне амплитуды повышенных крутильных колебаний не зависят от длины БТ, причем для ротора электродвигателя и редуктора она реализуются практически на одной частоте.

Продольные гармонические возмущения. Источником продольных колебаний в рассматриваемой механической системе может быть взаимодействие долота с забоем, пульсация нагнетаемого в гидравлическую систему бурового раствора, взаимодействие буровой колонны с устройствами ее крепления и другие. Ниже на рисунках представлена реакция в сечениях В и С на возбуждение продольных колебаний в верхней части колонны в точке А (вариант *b*). Приложенные возмущения вызывают в наблюдаемых сечениях продольные (рис. 5) и крутильные колебания (рис. 6).

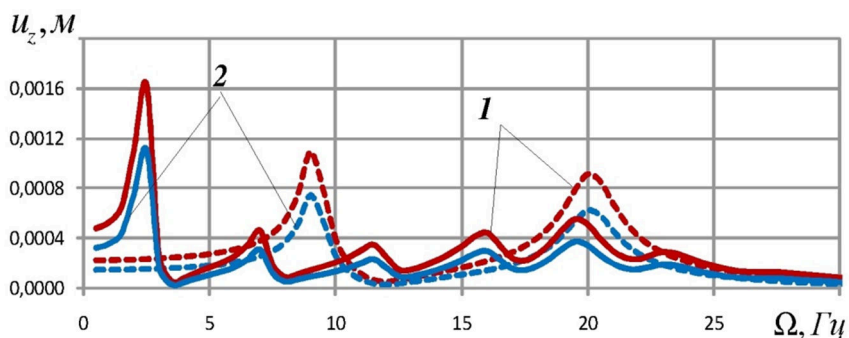


Рисунок 5 – Амплитуды продольных перемещений в зависимости от частоты крутящего момента:
 сплошные линии – для компоновки с 500 м БТ; штриховые линии для компоновки с 100 м БТ;
 1 – сечение электробур в точке В (ротор, статор); 2 – сечение в точке С (редуктор и корпус редуктора)

Диапазон повышенных амплитуд вынужденных продольных колебаний (независимо от длины БТ) ограничен промежутком $0 \div 30$ Гц. При большей длине буровой колонны (500 м) количество частот с повышенной вибрацией оказывается большим, чем при длине БТ 100 м. Продольные колебания в наблюдаемых сечениях происходят синхронно.

Возмущение продольных колебаний в точке А генерирует крутильные колебания в рассматриваемых сечениях в двух диапазонах: низкочастотный и высокочастотный. В низкочастотном диапазоне (рис. 6а) повышенные вибрации с одинаковой амплитудой испытывают статор электродвигателя и корпус редуктора. В высокочастотном диапазоне амплитуды повышенных крутильных колебаний зависят от длины БТ, причем для большей длины БТ (500 м) амплитуды вынужденных колебаний выше. Для ротора электродвигателя и редуктора повышенные вибрации реализуются практически на одной частоте.

Изгибные гармонические возмущения. Изгибные колебания в рассматриваемой системе обуславливаются взаимодействием долота с забоем, конструктивными особенностями вращающихся деталей в ре-



дукторе и роторе электродвигателя, статическим изгибом компоновки, пульсацией бурового раствора. Возмущение изгибных колебаний на роторе электродвигателя (вариант с) генерирует в наблюдаемых сечениях все виды колебаний: изгибные (рис. 7), продольные (рис. 8) и крутильные (рис. 9).

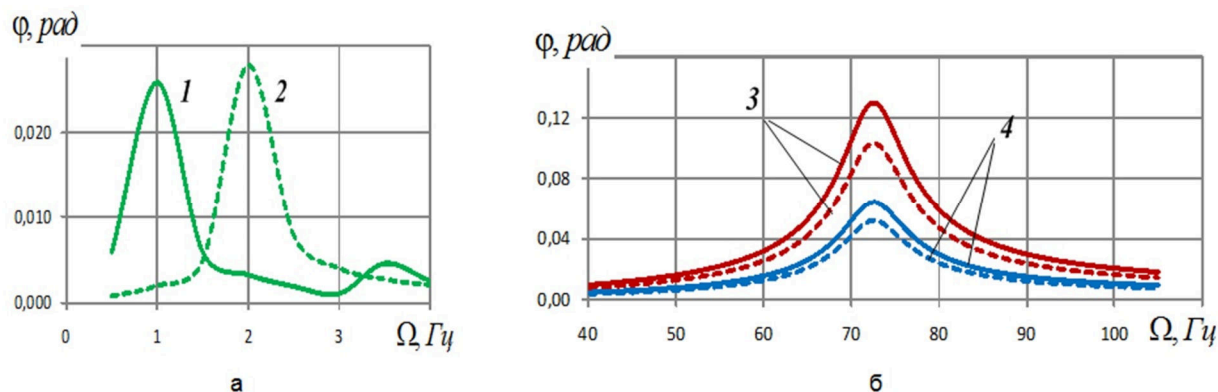


Рисунок 6 – Амплитуды угла закручивания в зависимости от частоты крутящего момента:
 а) статор электродвигателя и корпус редуктора: 1 – для 500 м БТ; 2– для 100 м БТ;
 б) ротор электродвигателя (3) для 500 м БТ и 100 м БТ; редуктор (4) для 500 м БТ и 100 м БТ

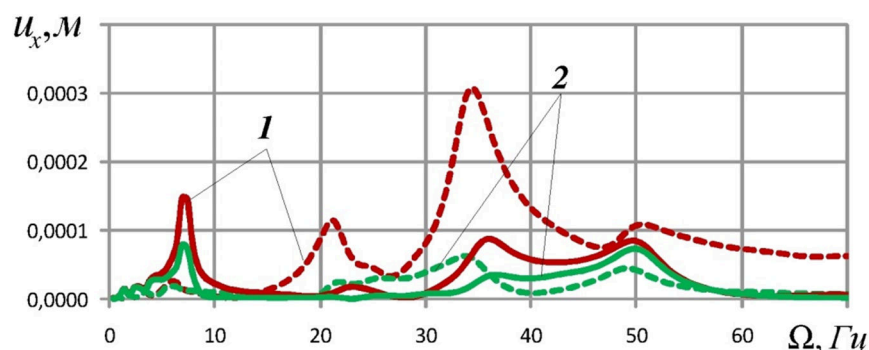


Рисунок 7 – Амплитуды поперечных перемещений в сечении В электродвигателя в зависимости от частоты крутящего момента:
 сплошные линии – для компоновки с 500 м БТ; штриховые линии для компоновки с 100 м БТ;
 1 – ротор; 2 – статор

Повышенные поперечные смещения возникают лишь в электродвигателе. Они локализованы в диапазоне 0 ÷ 60Гц. Количество максимумов на АЧХ в компоновке с 500 м БТ больше, чем для компоновки 100 м БТ. Примечательно, что изгибные колебания при заданном возмущении не генерируются в редукторе.

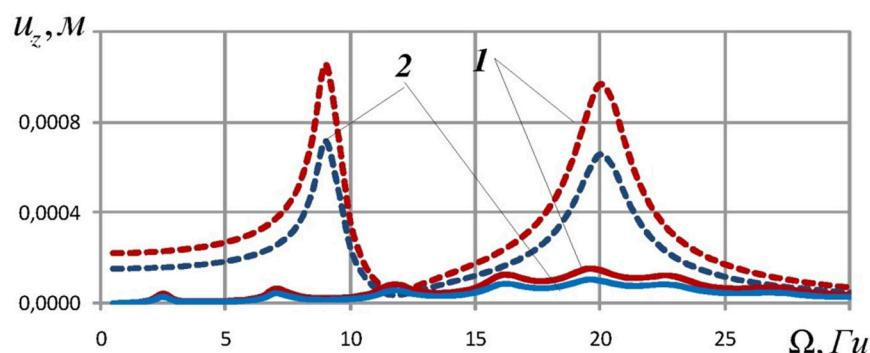


Рисунок 8 – Амплитуды продольных перемещений в зависимости от частоты крутящего момента:
 сплошные линии – для компоновки с 500 м БТ; штриховые линии для компоновки с 100 м БТ;
 1 – сечение электробура в точке В (ротор, статор); 2 – сечение в точке С (редуктор и корпус редуктора)

Как видно из рисунка 8, повышенные продольные вибрации возникают в электродвигателе и редукторе при компоновке 100 м БТ и имеют два синхронных максимума.

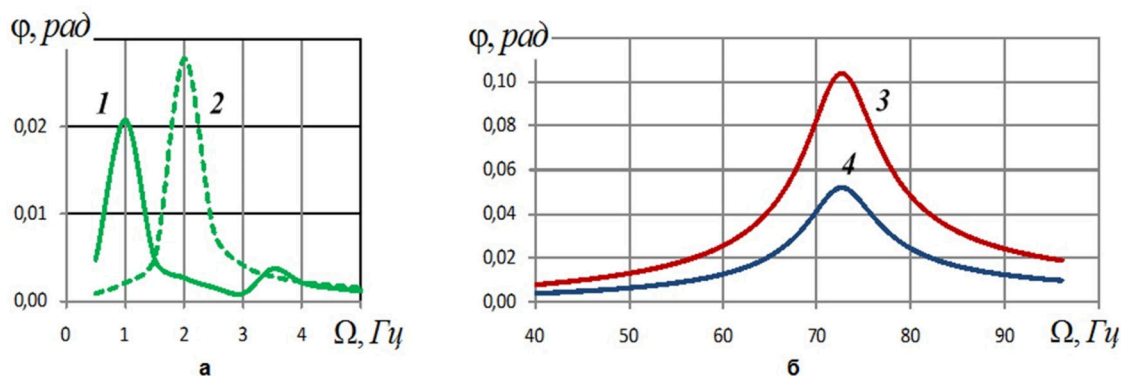


Рисунок 9 – Амплитуды угла закручивания в зависимости от частоты крутящего момента:
 а) статор электродвигателя и корпус редуктора: 1 – для 500 м БТ; 2 – для 100 м БТ;
 б) ротор электродвигателя (3) для 500 м БТ и 100 м БТ; редуктор (4) для 500 м БТ и 100 м БТ

Возмущение изгибных колебаний на роторе электродвигателя приводит к отклику крутильных колебаний в рассматриваемых сечениях В и С в низкочастотном и высокочастотном диапазонах. В низкочастотном диапазоне (рис. 9а) статор электродвигателя и корпус редуктора испытывают повышенные вибрации с одинаковой амплитудой. В высокочастотном диапазоне амплитуды повышенных крутильных колебаний не зависят от длины БТ, причем для ротора электродвигателя и редуктора повышенные вибрации реализуются практически на одной частоте.

Заключение

На основе анализа современного скважинного бурильного инструмента показано, что имеются благоприятные условия для создания перспективного инструмента – электробура нового поколения. Электробур обладает существенными преимуществами перед используемыми в настоящее время гидравлическими забойными двигателями, поэтому переход на электробурение обеспечит более высокое качество и скорость проходки скважин. Электробур характеризуется возможностью высокочастотного возбуждения колебаний, обусловленной высокой скоростью вращения ротора двигателя и высокочастотным взаимодействием деталей редуктора. На основе балочной конечно-элементной модели проведены исследования продольных, крутильных и изгибных колебаний электробура и редуктора при различных возмущениях компоновки бурильной колонны.

Литература:

1. «Новая нефть» для России. URL : <https://iz.ru/676411/elena-vinnitca/novaia-neft-dlia-rossii> (24.03.2018).
2. Фоменко Н.Ф. Бурение скважин электробуром. – М. : Недра, 1974. – 272 с.
3. К разработке инновационной технологии бурения скважин электробурами / А.А. Кожевников [и др.]. URL : <http://dropdoc.ru/doc/428411/k-razrabotke-innovacionnoj-tehnologii-bureniya-skvazhin> (24.03.2018).
4. Костышин В.С., Семенцова А.А. Характеристики современных электробуров и их информационные модели. URL : <https://www.sworld.com.ua/simpoz3/9.pdf>
5. Абызов Б.И. Перспективы развития электробурения как высокотехнологичного способа строительства нефтяных и газовых скважин // Нефть, газ и бизнес. – 2001. – № 2. – С. 5–60.
6. Новомет–УЭЦН, ППД, ПЭД. URL : <https://www.novomet.ru>
7. Деркач Н.Д., Крутик Э.Н. Новые конструкции редукторных турбобуров и результаты их использования // Доклад на конференции ОАО «Буровая техника»: «Техника и технология турбинного бурения. Действительность и перспективы». 21 декабря 2000 г. г. Москва.
8. Червинский В.П., Василенко В.В., Голубенко В.П. К вопросу применения электробуров при бурении нефтегазовых скважин. URL : http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/4639/1/vestnik_NPI_2013_26_Chervinskiy_K%20voprosu%20primeneniya.pdf (24.03.2018).
9. Лебедев Н.Ф. Динамика гидравлических забойных двигателей. – М. : Недра, 1981. – 251 с.
10. Бобров М.Г. Исследования поперечных колебаний винтового забойного двигателя : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.07 – Машины и агрегаты нефтяной и газовой промышленности. – М., 2000. – 171 с.
11. Деркач Н.Д., Пестренин В.М., Пестренина И.В. Балочная динамическая модель винтового забойного двигателя // Булатовские чтения : Материалы I Международной научно-практической конференции в 5 т. : сборник статей / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенко. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. – Т. 3: Бурение нефтяных и газовых скважин. – 2017. – С. 64–75.
12. Деркач Н.Д., Пестренин В.М., Пестренина И.В. Влияние КНБК на динамику винтового забойного двигателя ДР-240.NGT при бурении долотами большого диаметра // Нефть.Газ.Новации. – 2017. – № 11. – С. 35–39.
13. Гладь И.В., Киянюк А.И. Исследование гармонического спектра токов фаз электробура при бурении скважин // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета. – 2011. – Т. 1. – С. 39–97.

**References:**

1. «New oil» for Russia. URL : <https://iz.ru/676411/elena-vinnitca/novaia-neft-dlia-rossii> (24.03.2018).
2. Fomenko N.F. Drilling of wells with electric drills. – M. : Nedra, 1974. – 272 p.
3. To the development of innovative technology for drilling wells with electric drills / A.A. Kozhevnikov [ets.]. URL : <http://dropdoc.ru/doc/428411/k-razrabotke-innovacionnoj-tehnologii-bureniya-skvazhin> (24.03.2018).
4. Kostyshin V.S., Sementsova A.A. Characteristics of modern electric drills and their information models. URL : <https://www.sworld.com.ua/simpoz3/9.pdf>
5. Abyzov B.I. Prospects for the development of electric drilling as a high-tech method of building oil and gas wells // Oil, gas and business. – 2001. – № 2. – P. 5–60.
6. Novomet-ESP, PPD, PED. URL : <https://www.novomet.ru>
7. Derkach N.D., Krutik E.N. New designs of gearbox turbodrills and the results of their use // A report at the conference «Drilling equipment»: «Technique and technology of turbine drilling. Reality and prospects». December 21, 2000 Moscow.
8. Chervinsky V.P., Vasilenko V.V., Golubenko V.P. On the application of electric drills in the drilling of oil and gas wells. URL : http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/4639/1/vestnik_HPI_2013_26_Chervinskiy_K%20voprosu%20primeneniya.pdf (24.03.2018).
9. Lebedev N.F. Dynamics of hydraulic downhole motors. – M., Nedra, 1981. – 251 p.
10. Bobrov M.G. Studies of transverse vibrations of a screw downhole motor : Diss. the thesis for a degree of Candidate of Technical Sciences: 05.04.07 – Machines and units of the oil and gas industry. – M., 2000. – 171 p.
11. Derkach N.D., Pestrenin V.M., Pestrenina I.V. The beam dynamic model of the screw downhole motor // Bulatovskie readings: Materials of the I International scientific and practical conference in 5 volumes : collection of articles / Under the general. Ed. Dr. Tech. Sciences, prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing House – Yug. – V. 3: Drilling of oil and gas wells. – 2017. – P. 64–75.
12. Derkach N.D., Pestrenin V.M., Pestrenina I.V. Influence of BHA on the dynamics of the screw downhole motor DR-240.NGT when drilling with large-diameter bits // Neft.Gaz.Novatsii. – 2017. – № 11. – P. 35–39.
13. Glad I.V., Kiyanyuk A.I. Investigation of the Harmonic Spectrum of Electric Beam Currents in Drilling Wells // Oil and Gas of Western Siberia: Materials of the International Scientific and Technical Conference on the 55th Anniversary of the Tyumen State Oil and Gas University. – 2011. – V. 1. – P. 39–97.