

УДК 622.24.051.52

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР БУРОВОГО СТАВА
В УСТАНОВКАХ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ШНЕКОВОГО БУРЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПОДШИПНИКОВ СУХОГО ТРЕНИЯ**

Л. Е. Маметьев, О. В. Любимов, Ю. В. Дрозденко

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: oleg_lyubimov@mail.ru, ул. Весенняя, 28, 650026, г. Кемерово, Россия*

Выделен ряд факторов, оказывающих влияние на энергозатраты при транспортировании продуктов бурения от забоя к точке выгрузки при помощи шнекового бурового става. Особо значимым фактором является недостаточная надежность опорно-якорных и опорно-центрирующих устройств бурового става, делающая невозможным длительное бурение без технического обслуживания. Представлены и проанализированы результаты стендовых испытаний подшипников с антифрикционным наполнителем опорных узлов шнекового бурового става, необслуживаемых в пространстве буримых скважин. Описаны конструктивные решения, предложенные по результатам исследований, направленные на повышение надежности опорно-якорных и опорно-центрирующих устройств шнекового бурового става.

Бурение, транспортирование, став шнековый, расширитель, опорно-центрирующее устройство, подшипник качения, наполнитель, смазка, герметизация

Основной принцип работы современных бурошнековых комплексов для проходки горизонтальных и слабонаклонных скважин при бестраншейной прокладке коммуникаций различного назначения заключается в том, что совокупная механическая энергия, вырабатываемая силовыми установками, расходуется тремя потоками, причем величины этих потоков изменяются в зависимости от принятой технологии бурения и длины скважины, а также от реализуемых в ходе процесса бурения многочисленных кинематически взаимосвязанных или несвязанных вращательных и поступательных движений.

Первый энергетический поток направлен на разрушение забоя скважины. Его величина определяется свойствами разрабатываемых пород и регулируется за счет применения адаптивного породоразрушающего инструмента и средств его подачи на забой [1–4]. Второй энергетический поток затрачивается на крепление стенки скважины при сохранении необходимого объема призабойного пространства и возводимой выработки в целом. Третий энергетический поток обеспечивает транспортирование продуктов бурения от забоя к месту выгрузки. Структура формирования этого энергопотока сложна, зависит от ряда факторов (физико-механические свойства и длина транспортирования продуктов бурения, физическое взаимодействие элементов конструкции и др.) [5–13]. Существенную долю в этом потоке составляют энергозатраты, связанные с техническим обслуживанием опорно-якорных и опорно-центрирующих устройств бурошнекового става, определяемые их низкой надежностью.

В мировой практике горизонтального и направленного бурения применяют опорные подшипниковые узлы, отличающиеся широким спектром конструктивных особенностей [9], которые не позволяют снизить затраты энергии на вращение бурового става и ограничить внезапные отказы из-за заклинивания подшипников качения под напором проникающего в узлы потока выбуриваемого материала.

Цель исследований — повышение эксплуатационной надежности и долговечности опорных подшипниковых узлов шнекового бурового става, приводящее к снижению энергоемкости процесса бурения и увеличению возможной протяженности горизонтальных и слабонаклонных скважин в широком диапазоне диаметров. Для ее достижения проведены стендовые испытания, уточняющие эксплуатационные показатели опорных узлов, перспективных с точки зрения использования в горном оборудовании, в частности в шнековом буровом стае машин горизонтального бурения. На основании полученных результатов предложены варианты опорных узлов, показатели надежности и долговечности которых позволяют длительно эксплуатировать их без технического обслуживания при бурении скважин.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Практика эксплуатации машин горизонтального шнекового бурения для реализации двухэтапной технологии проходки скважин свидетельствует о перспективности применения в многочисленных опорах бурошнекового инструмента подшипников качения с твердосмазочным антифрикционным наполнителем (АФЗ). Известны примеры успешного использования подшипников этого типа в опорах расширителей обратного хода, прицепных устройств, машинного агрегата [7–9]. Такие подшипники изготавливаются из стандартных шарикоподшипников путем заполнения свободного внутреннего пространства между телами качения, стандартным змейковым сепаратором, оставляемым в качестве арматуры, и кольцами пастообразным антифрикционным компаундом с последующим его отверждением. Зазоры между отвердевшим наполнителем и деталями подшипников формируются в процессе последующей приработки. Основным достоинством подшипников данного типа является самосмазывание и одновременное выполнение функции самогерметизации фрикционной зоны за счет малых лабиринтных зазоров между отвердевшим АФЗ и кольцами подшипника.

Для оценки величин зазоров, формируемых между АФЗ и внутренним межкольцевым пространством подшипника, выполнен стендовый эксперимент, при обработке результатов которого использованы методы и средства теории вероятностей и математической статистики. Изучение зазоров между АФЗ и подшипниковыми кольцами проводилось на осевом распиле. Перед распилом подшипника его детали фиксировались от относительного движения. Затем из подшипника вырезался сектор и на его поверхности отмечалось девять характерных точек для каждого зазора, в которых определялась его величина. Зазоры измерялись на микроскопе МБС-9 при увеличении 2х-56х с помощью окуляра с измерительной шкалой и сменного блока объективов.

Наработка ресурса подшипников осуществлялась на испытательной машине ЦКБ-72. С целью предохранения твердосмазочного антифрикционного наполнителя от загрязнения маслом, а также обеспечения естественного для данного типа подшипников теплоотвода гидравлическую систему нагружения и смазки подшипников заменили системой грузов и рычагов с переменной длиной плеча. Значения фиксированной радиальной нагрузки принимались равными собственному весу подшипникового узла испытательной машины с шаговыми приращениями веса дополнительных грузов. При этом суммарное значение не превышало критического, определяющего переход на критерий отказа по катастрофическому развитию усталостных процессов на поверхностях качения подшипников. Конструкция кожуха испытательной головки и коренного вала обеспечивала легкость визуального наблюдения и возможность быстрого демонтажа подшипника для периодического неразрушающего контроля.

Неразрушающий контроль изменения величин зазоров в процессе наработки ресурса осуществлялся рентгенографическим методом, основанным на ослаблении интенсивности рентгеновского излучения при прохождении через контролируемый подшипник. При этом обеспечивалась документальность контроля.

Для доказательства отсутствия у необслуживаемых подшипников с АФЗ отказа по критерию прихвата шнекового бурового става из-за проникновения продуктов бурения в их фрикционную зону были проведены эксперименты на испытательном стенде КузГТУ, представляющем собой секцию инвентарной обсадной трубы с размещенной внутри секцией шнековой спирали, приводимой во вращение электроприводом. Подшипники с АФЗ монтировались в камере загрузки продуктов разрушения, расположенной в отрезке инвентарной обсадной трубы, нагружались весом секции шнековой спирали и приводились во вращение приводом вращателя. Корпус опоры оставался открытым так, чтобы подшипники имели непосредственный контакт с продуктом разрушения, в качестве которого использовалась глина как наиболее часто встречающийся вид грунта, разрабатываемый бурошнековым способом [7, 8]. Одна из серий эксперимента реализована с подшипниками, АФЗ в которых был разрушен, зазоры катастрофически увеличены. Это позволило оценить эффективность использования зазоров между АФЗ и внутренним межкольцевым пространством подшипника как гидравлических сопротивлений, оказывающих препятствие проникновению продуктов бурения в его внутреннее пространство.

В качестве характеристик транспортируемой среды, влияние которых на работоспособность подшипников с АФЗ оценивалось по мере наработки ресурса T (ч), принимались: влажность W (%) транспортируемой среды, коэффициент ψ заполнения шнековой спирали. В качестве выходного параметра эксперимента оценивалась величина контролируемого с помощью комплекса тензоизмерительной аппаратуры момента сопротивления вращению подшипникового узла M_{\max} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка массива данных, полученных в результате измерения зазоров в подшипниках, позволила получить численные характеристики зазоров между антифрикционным наполнителем и кольцами как случайных величин. В качестве условной координаты B_j принято отношение $2x_j/B$; при этом x_j — расстояние j -го сечения от центра подшипника, изменяющееся в пределах $-0.5B \div +0.5B$ (рис. 1).

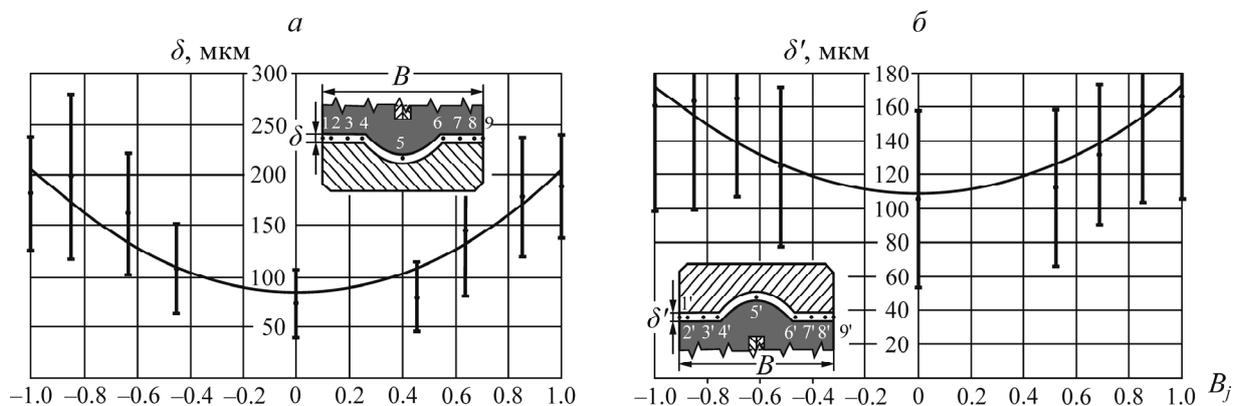


Рис. 1. Распределение зазоров по ширине подшипника с АФЗ: a — зазор между антифрикционным наполнителем и внутренним кольцом подшипника δ ; b — зазор между антифрикционным наполнителем и наружным кольцом подшипника δ'

С использованием полученного вида функциональных зависимостей оценка начальных величин зазоров в любом сечении подшипника с АФЗ проводится по следующему алгоритму: задание условной координаты сечения B_j ; определение величин зазоров δ_1 и δ'_1 на торце подшипника; определение величин δ_j , δ'_j , $\sigma_j / \bar{\delta}_j$, $\sigma'_j / \bar{\delta}'_j$ по полученным зависимостям или графикам; оценка дисперсий:

$$\sigma = \{\sigma_j / \bar{\delta}_j = f(B_j)\} \{\delta_j = \varphi(B_j)\}; \quad \sigma' = \{\sigma'_j / \bar{\delta}'_j = f_1(B_j)\} \{\delta'_j = \varphi_1(B_j)\}. \quad (1)$$

Продукты разрушения, образующиеся при бурении глин, углей и других пород, при увлажнении формируют гидросмеси, которые относятся к вязко-пластичным бингамовским жидкостям, ведущим себя при напряжениях, создаваемых шнековым буровым ставом, как ньютоновские жидкости, причем их движение проходит в ламинарном режиме [12]. С учетом этого возрастание коэффициента гидравлического сопротивления конфузورного сужения к $B_j = 0$ зазоров подшипника с АФЗ опоры бурошнекового инструмента составит: для зазора δ — 3.4–3.7 раза, для зазора δ' — 5.4–5.6 раза.

Для описания закономерностей изменения величин зазоров между АФЗ и кольцами по сечению $B_j = 0$, а также соответствующих им радиальных составляющих зазоров между заполнителем и телами качения в гнездах, в зависимости от наработанного ресурса при фиксированной нагрузке, предложена аппроксимация полиномами. Интерпретации по результатам расчета коэффициентов регрессии представлены на рис. 2 для δ (а), δ' (б), δ_r (в) и δ'_r (г).

Статистическая обработка результатов стендовых испытаний показала, что процесс изменения зазоров в подшипнике с АФЗ в зависимости от наработки с высокой степенью достоверности описывается зависимостью, выраженной полиномами 3-го порядка:

$$\delta^{(k)}(L) = \delta_0^{(k)} + \sum_{i=1}^3 b_i^{(k)} \left(\frac{P}{C}\right) L^i, \quad (2)$$

где $\delta_0^{(k)}$ — начальный зазор в сечении $B_j = 0$; $b_i^{(k)}(P/C)$ — коэффициенты регрессии, зависящие от относительной нагрузки; L — наработка.

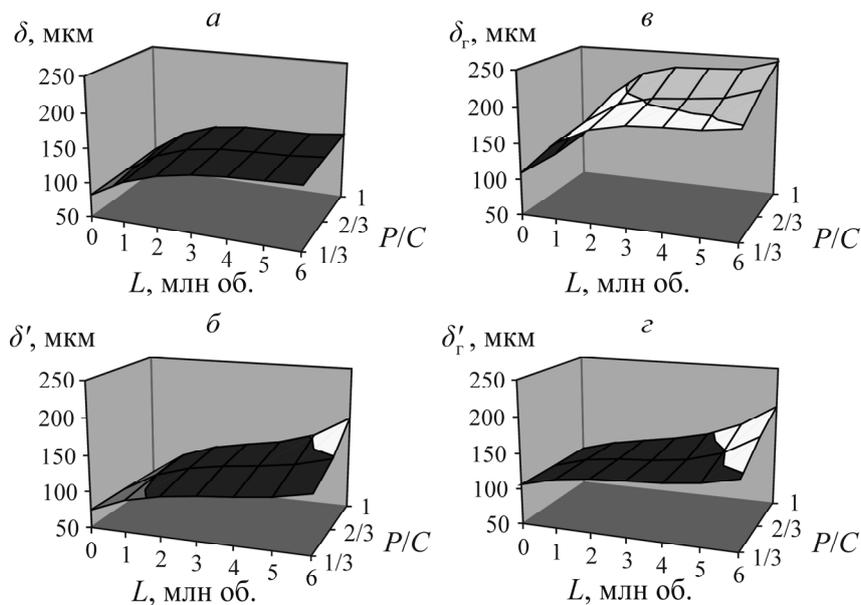


Рис. 2. Изменение зазоров в подшипнике с АФЗ в зависимости от наработки: δ_r — зазор между внутренней поверхностью и телом качения в гнезде антифрикционного заполнителя; δ'_r — зазор между наружной поверхностью и телом качения в гнезде антифрикционного заполнителя

Вероятность контакта твердосмазочного заполнителя с кольцами определяет возникновение динамических воздействий на АФЗ и условия износных процессов во внутренней конструкции, в то же время практически подтверждает работу зазоров в подшипнике с АФЗ в режиме гидравлических сопротивлений, оказывающих препятствие проникновению продуктов бурения во внутреннее пространство подшипника, чем обеспечивается его самогерметизация. Полученные результаты являются уточняющими для формирования в дальнейшем математической модели, описывающей работоспособность опорных подшипниковых узлов шнекового бурового става.

Достоверное представление зазоров в подшипнике с АФЗ как гидравлических сопротивлений послужило основой для реализации идеи подшипникового узла секционного бурошнекового инструмента (рис. 3), включающего ступенчатый вал 1 с замковыми приспособлениями 2 и 5 для крепления к секциям бурошнекового инструмента 8, корпуса 3, в котором установлены два наружных самогерметизирующихся радиальных подшипника качения 9 и два внутренних упорных подшипника качения 10. Подшипники с АФЗ используются для оптимизации массогабаритных характеристик (за счет полного отсутствия в конструкции узла крепящихся к корпусу осевых крышек с уплотнениями) и эксплуатационной надежности при недоступности для технического обслуживания опорного узла в процессе бурения [14, 15].

Ступенчатый вал 1 предварительно собран с подшипниками качения 9 и 10 в корпусе 5. На нем выполнен шлицевой хвостовик 4, на который для окончательной сборки узла надето замковое приспособление 5 в виде шлицевой втулки, свободно перемещающейся по хвостовику и упирающейся во внутренние упорные подшипники качения 10. Регулирование осевых зазоров, затяжка и стопорение в паре внутренних упорных подшипников качения 10 осуществляются с помощью гайки 7 и стопорного кольца 6. Затем опорный подшипниковый узел размещают между секциями бурошнекового инструмента 8 с использованием замковых приспособлений 2 и 5.

При длительной эксплуатации зазоры в упорных подшипниках качения 10 возрастают, но могут быть минимизированы в процессе периодического технического обслуживания элементов шнекового бурового става путем повторного регулирования, затяжки и стопорения.

После проведения эксперимента на каждом из сочетаний уровней входных параметров проводилась разборка и осмотр экспериментального опорного узла для оценки характера проникновения транспортируемой среды. Наблюдалось воздействие увлажненной транспортируемой среды на корпус опорного узла, сквозное проникновение транспортируемой среды с высокой влажностью через опорный узел.

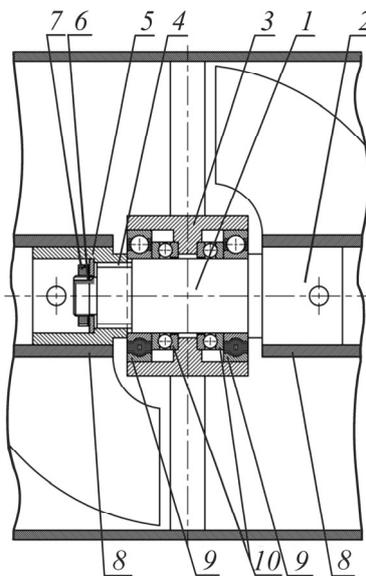


Рис. 3. Предлагаемый опорный подшипниковый узел

Для представления регрессионных зависимостей использовались полиномы 4-й степени:

$$M_{\max} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} X_i^j, \quad M_{\max} = b_0 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 b_{ij} \Phi_i^j, \quad (3)$$

где X_i , Φ_i — i -й фактор в кодированном и натуральном виде; β_{ij} , b_{ij} — коэффициенты регрессий в кодированном и натуральном виде соответственно.

В результате регрессионного анализа для выделенных факторных полупространств значимость коэффициентов нелинейной регрессии доказана с помощью t -критерия Стьюдента, адекватность моделей — с помощью F -критерия Фишера. Полученные для факторных полупространств функциональные зависимости M_{\max} от T и W при фиксированном $\psi = 0.5$ приведены на рис. 4. Установлено, что при наличии в узле исправных подшипников с АФЗ за период между профилактическим обслуживанием бурового оборудования (составляющий 720 ч) наблюдается возрастание M_{\max} с последующей стабилизацией к концу периода. В случае разрушения АФЗ, когда зазоры между ним и деталями подшипника повреждены и не выполняют функции гидравлических сопротивлений, наблюдается кратковременный скачок M_{\max} с последующим падением до величин, характерных для исправных подшипников с АФЗ, что связано, предположительно, с изменением свойств движущейся сквозь подшипник увлажненной транспортируемой среды как вязко-пластичной бингамовской жидкости.

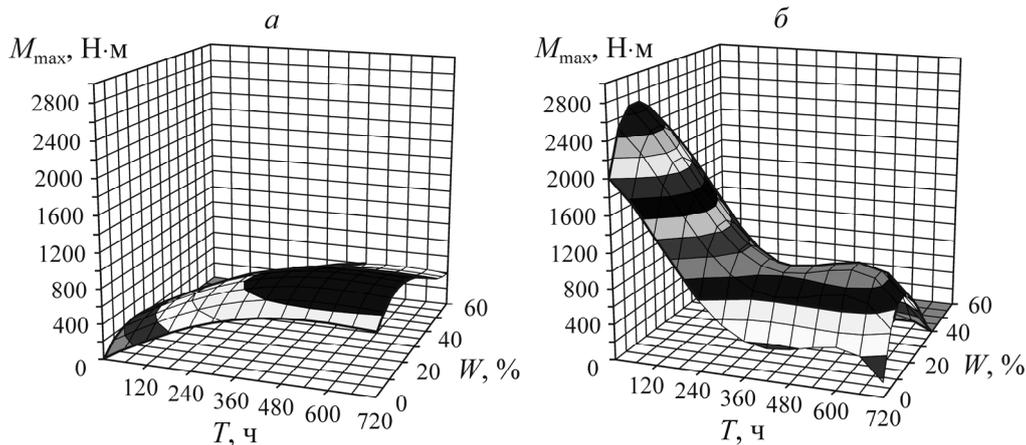


Рис. 4. Функциональные зависимости M_{\max} от T и W при $\psi = 0.5$: a — исправные подшипники с АФЗ в опорном узле; b — подшипники с разрушенным АФЗ в опорном узле

Эффективность использования АФЗ в опорных узлах бурового оборудования послужила основой изобретений, содержащих способ и устройство для бурения горизонтальных и слабонаклонных скважин [16, 17]. Предложено в местах разрыва шнековой спирали l_p между секциями устанавливать опорные подшипниковые узлы 3, размещенные внутри вкладышей-замков 2, жестко соединенных с секциями комплекта обсадных труб 1 (рис. 5). На внутренней поверхности вкладышей-замков 2 жестко закреплена профильная винтовая линия 6, а в ее межшаговом пространстве размещены трехгранные призмы лучей 4 опорных подшипниковых узлов 3 с возможностью осевого перемещения и поворота относительно оси скважины путем кинематической связи с профильной винтовой линией 6. Секционно наращиваемые валы 7, предназначенные для дистанционного управления головной частью шнекобурового инструмента, на наружной поверхности вкладышей-замков 2 центрируются и защищаются опорно-направляющими кожухами 5.

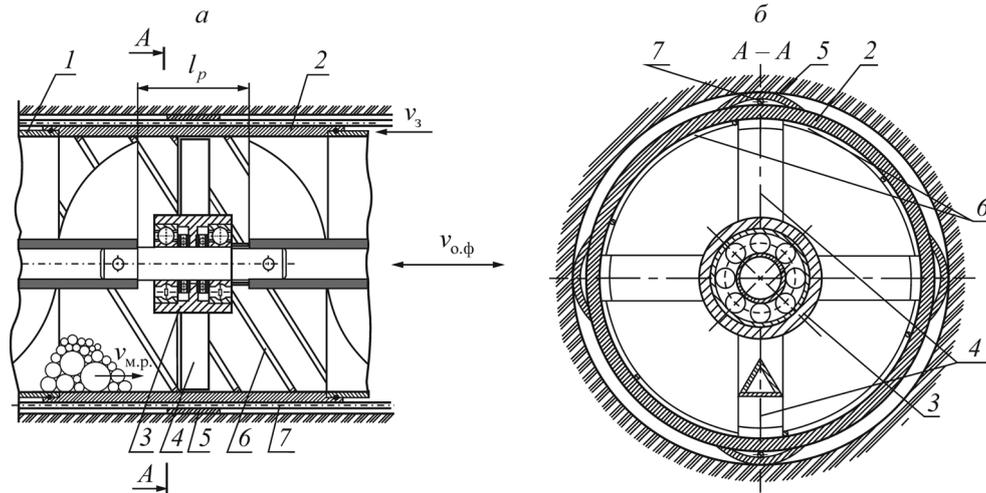


Рис. 5. Предлагаемая конструкция центрирующей опоры шнекобурового става

Вкладыши-замки 2 могут быть выполнены из отрезка трубы с размерами, идентичными размерам секций колонны обсадных труб 1, и, следовательно, после сборки за счет жесткого соединения составят с ними одно целое. Профильная винтовая линия 6 может быть изготовлена из прутка, приваренного к внутренней поверхности вкладышей-замков 2, за счет чего имеет с ней жесткое крепление.

Перемещаясь под действием колебательных движений в осевом направлении со скоростью $v_{o,ф}$, уменьшенные по своим массогабаритным характеристикам за счет применения АФЗ опорные подшипниковые узлы 3 с лучами 4, трехгранные призмы которых имеют кинематическую связь с профильной винтовой линией 6, т. е. образуют с ней подвижное многозаходное несамотормозящее винтовое сопряжение, совершают также поворот относительно оси скважины с малой частотой вращения. Призмы лучей 4 опорных подшипниковых узлов 3 в разрывах шнековой спирали l_p обращены ребром двугранного угла в противоположную сторону от расширителя на головной части става, что позволяет использовать во время движения, перекрывающего l_p , поверхности их боковых граней для транспортирования продуктов разрушения забоя, повышая тем самым транспортирующую способность бурошнекового инструмента.

ВЫВОДЫ

Установлены функциональные зависимости величин зазоров, формируемых между антифрикционным наполнителем и внутренним межкольцевым пространством подшипника качения, от условной координаты сечения и определены коэффициенты гидравлического сопротивления при прохождении через зазоры продуктов разрушения, образующихся при бурении и ведущих себя при взаимодействии со шнековым буровым ставом как ньютоновские жидкости в ламинарном режиме истечения. Определены зависимости момента сопротивления вращению подшипников с АФЗ в опорных узлах бурошнекового инструмента от характеристик транспортируемых продуктов бурения, которые имеют вид полиномов четвертой степени. Выявлен минимальный уровень ресурсных показателей подшипников с АФЗ в опорных узлах бурошнекового инструмента, определяющий гарантированный период $T=720$ ч при их эксплуатации без технического обслуживания в процессе бурения скважин. Обоснована целесообразность применения технических решений для бурения горизонтальных и слабонаклонных скважин с использованием конструкций опорных узлов с АФЗ для уменьшения длины разрывов шнековой спирали, повышения транспортирующей способности бурошнекового инструмента и сокращения простоев в процессе проходки скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петреев А. М., Гилета В. П., Смоляницкий Б. Н. Повышение эффективности работы грунтозаборного устройства // ФТПРПИ. — 1999. — № 1. — С. 60–66.
2. Опарин В. Н., Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Обоснование принципов построения конструктивной схемы подземной ракеты // ФТПРПИ. — 2010. — № 5. — С. 54–56.
3. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Распределение напряжений между деталями узлов крепления дисковых инструментов при разрушении проходческих забоев // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 93–100.
4. Khoreshok A. A., Mametyev L. E., Borisov A. Yu., Vorobyev A. V. The distribution of stresses and strains in the mating elements disk tools working bodies of roadheaders, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, Vol. 91. — P. 012084.
5. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 89–90.
6. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Шер Е. Н. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 66–74.
7. Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В. Обоснование транспортирующей способности горизонтального шнекового бурового става // ГИАБ. — 2011. — № 5. — С. 22–25.
8. Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В. К вопросу реализации бурошнековых технологий в горном деле и подземном строительстве // ГИАБ. — 2012. — № 2. — С. 211–217.
9. Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В. Согласование транспортирующей и погрузочной способности шнекобурового инструмента на этапе расширения горизонтальных скважин // Сб. материалов: Теоретический и практический взгляд на современное состояние науки / КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2015. — С. 80–82.
10. Пат. 156637 РФ. Расширитель для бурения горизонтальных скважин / Л. Е. Маметьев, О. В. Любимов, Ю. В. Дрозденко, Е. А. Маметьев, К. Д. Пономарев // Опувл. в БИ. — 2015. — Бюл. № 31. — 2 с.
11. Пат. 156638 РФ. Расширитель для бурения горизонтальных скважин / Л. Е. Маметьев, О. В. Любимов, Ю. В. Дрозденко, Е. А. Маметьев, К. Д. Пономарев // Опувл. в БИ. — 2015. — Бюл. № 31. — 2 с.
12. Ананьев А. Н. Обоснование и выбор средств, повышающих эффективность работы шнекового бурового става при бурении горизонтальных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Кемерово: КузПИ, 1990. — 18 с.
13. Mametyev L., Lyubimov O. Elaboration of structural and technological adapting parameters and components of auger machines to the customer's requirements, International Society for Trenchless Technology — 26th No-Dig Int. Conf. and Exhibition 2008, No-Dig 2008, Moscow, 2008. — P. 104–107.
14. Mametyev L., Drozdenko Yu., Lyubimov O. Evaluation of the technical condition of auger equipment units by vibration inspections, The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, Kemerovo, Russia, October 10–12, 2016, Atlantis press, Amsterdam–Paris–Beijing, 2016.
15. Пат. 144475 РФ. Опорный подшипниковый узел секционного бурошнекового инструмента / Л. Е. Маметьев, О. В. Любимов, Ю. В. Дрозденко // Опувл. в БИ. — 2014. — Бюл. № 23. — 2 с.
16. Маметьев Л. Е., Любимов О. В., Дрозденко Ю. В. Совершенствование конструкции опор инструмента бурошнековых машин // Сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф.: Инновации в машиностроении / КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева, Алтайский ГТУ им. И. И. Ползунова, НГТУ, Бийский технологический институт, МИП Техмаш / под ред. В. Ю. Блюменштейна, А. А. Баканова, О. А. Останина. — 2015. — С. 548–552
17. Пат. 2578081 РФ. Способ бурения горизонтальных и слабонаклонных скважин и устройство для его осуществления / Л. Е. Маметьев, О. В. Любимов, Ю. В. Дрозденко, Е. А. Маметьев, К. Д. Пономарев // Опувл. в БИ. — 2016. — Бюл. № 8. — 14 с.

Поступила в редакцию 22/XII 2016