

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ СМАЗКИ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

© 2016 С.А. Белокоровкин, И.Д. Ибатуллин, Д.Р. Загидуллина

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

В статье показана усовершенствованная конструкция опоры буровых долот с принудительной подачей смазочного материала. Расходная система смазки обеспечивает постоянное обновление смазочного материала в опоре из резервуара и удаление отработавшей смазки из опоры в процессе бурения. В докладе показана методология расчета системы смазки опор буровых долот, учитывающая свойства смазочного материала, условия эксплуатации долота, а также конструкционные материалы и покрытия, используемые в опоре.

Ключевые слова: опоры скольжения, методология проектирования системы смазки, буровое долото.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование системы смазки является важным этапом создания герметизированных узлов трения, работающих в условиях высоких нагрузок. Существующие методологии проектирования таких систем обычно учитывают весьма ограниченное число параметров смазки, включая вязкость и теплоемкость. В действительности, влияние смазки на узел трения следует рассматривать гораздо шире. В данной статье на примере опор скольжения буровых долот будет показана новая методология проектирования расходной системы принудительной смазки, отдельные элементы которой могут быть полезны при проектировании других герметизированных узлов трения, в том, числе авиационной техники.

1. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ СМАЗКИ ОПОР БУРОВЫХ ДОЛОТ

Для обеспечения циркуляции смазочного материала в опоре разработана система смазки бурового шарошечного долота с герметизированными опорами [1], включающая узел компенсации смазки в опоре и систему каналов и полостей, соединяющих узел компенсации смазки с зонами трения в опоре, эквивалентная гидравлическая схема которой приведена на рисунке 1.

На приведенной схеме скважина 1 в области забоя обозначена как резервуар, находящийся под давлением, создаваемым столбом бурового раствора и напором буровой жидкости. Внешнее давление передается в систему смазки долота че-

рез резиновую диафрагму (обозначенную плунжерным узлом) 2. Внутренняя полость плунжера представляет смазочный резервуар, находящийся за диафрагмой долота. Через данный резервуар происходит заправка смазочного материала в опору долота, после чего отверстие закрывается заглушкой 3. При необходимости через данную заглушку можно осуществлять повторную заправку долота смазкой.

Из резервуара смазка поступает в сеть смазочных каналов 4, выходящих на поверхности трения опоры, которые ввиду малости зазоров представлены на схеме дросселем 5. Причем наиболее «узкий» участок представлен упорным подшипником, где две плоские поверхности, составленные плавающей шайбой и цапфой, а также плавающей шайбой и шарошкой, прижимаются друг к другу под нагрузкой более тонны. Поэтому для обеспечения гарантированного зазора, обеспечивающего прохождение смазки в опору необходимо на поверхности шайбы изготовить масляные канавки, определяющие скорость течения смазки по системе смазки. В случае, когда по внешним или внутренним причинам происходит рост давления, в системе смазки открывается клапан 6 и смазка начинает заполнять гидроцилиндр 7 пока давление в гидроцилиндре и внешнее давление не сравняются. При снижении внешнего давления отработавшая смазка из гидроцилиндра за счет запасенного в нем давления поступает через второй обратный клапан 8 на слив в затрубное пространство.

Узел компенсации смазки (рис. 2) включает стальной стакан 1 и связанную с ним эластичную диафрагму 2, заполненные смазочным материалом. Система каналов и полостей включает: полость масляного резервуара 3, в которой установлен узел компенсации смазки; длинный смазочный канал 4, соединяющий полость масляного резервуара 3 с верхней полостью 5 в замковом пальце 6; короткий канал 7, соединяющий верх-

*Белокоровкин Сергей Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения». E-mail: id_ildar@mail.ru
Ибатуллин Ильдар Дугласович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». Загидуллина Динара Радиевна, аспирант кафедры «Технология машиностроения».*

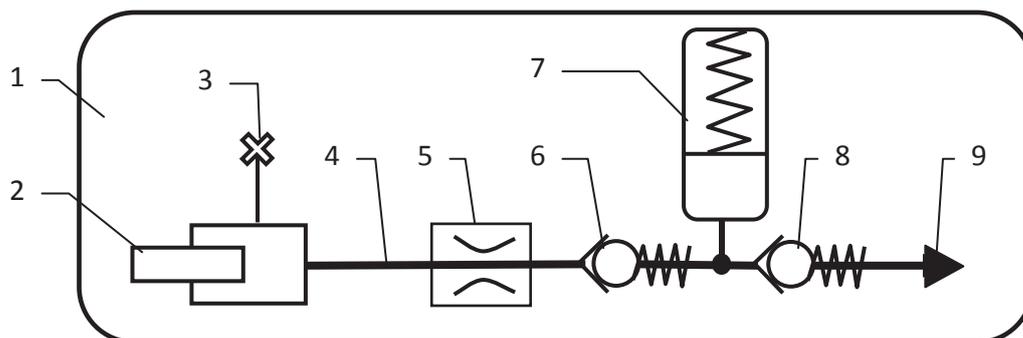


Рис. 1. Эквивалентная гидравлическая схема системы смазки с принудительной прокачкой за счет изменения внешнего давления

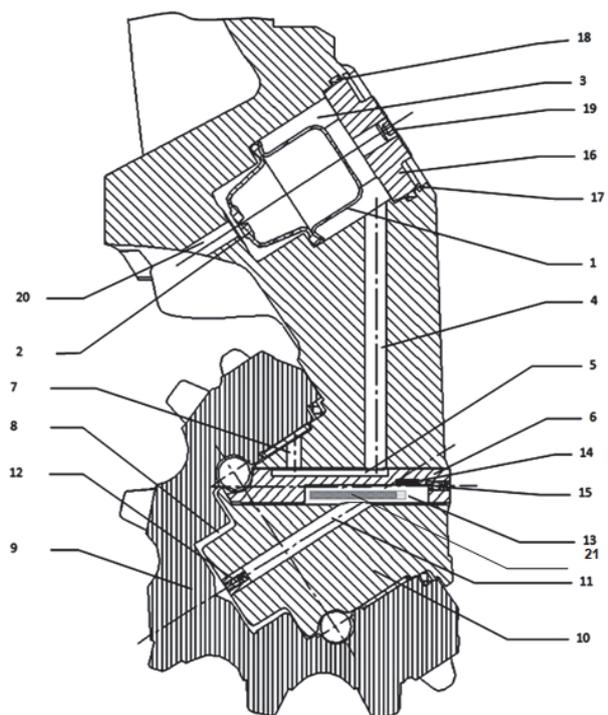


Рис. 2. Усовершенствованная система смазки герметизированной опоры

ную полость 5 в замковом пальце с полостью 8 опоры, расположенной между поверхностями шарошки 9 и цапфы лапы 10, охватывающей все зоны трения в опоре; канал по оси цапфы 11 связывающий полость 8 опоры через впускной клапан 12, расположенный вблизи упорного торца цапфы, с нижней полостью 13 замкового пальца 6, внутри которого расположены постоянный магнит 14 и выпускной клапан 15, расположенный вблизи спинки лапы.

Причем нижняя полость 13 и верхняя полость 5 замкового пальца 6 не сообщаются друг с другом. В полости масляного резервуара установлена крышка 16, закрепленная с помощью разжимного стопорного кольца 17 и герметизирующего эластичного уплотнения 18. В отверстие крышки установлена резьбовая пробка 19. Снизу масляный резервуар снабжен отверстием 20 со стороны затрубного пространства. Стакан 1 имеет отверстие для возможности выхода смазочного

материала из стакана под внешним давлением, действующим на эластичную диафрагму, в полость масляного резервуара.

При эксплуатации долота на пути перемещения смазки наиболее труднопроходимым участком является область, занимаемая упорным подшипником. Эта область представляет собой две плоские поверхности, образованные посеребренной упорной шайбой и торцевой поверхностью цапфы, прижатые друг к другу усилием в десятки тысяч Ньютонов. Для возможности перемещения смазки через данный участок необходимо на поверхности шайбы создать винтовую смазочную канавку. Причем направление витка должно обеспечивать «нагнетание» смазки при вращении шарошки в область вершины цапфы. При наличии в конструкции долота колпачка, такую же канавку необходимо сделать и на его поверхности. Поперечное сечение и длина канавки выбирается из условия возможности прокачивания смазки по ее полости в течение всего срока службы долота с учетом возможного износа плавающих элементов

Перед началом эксплуатации долота смазочный материал заполняет полость масляного резервуара 3, длинный канал 4, верхнюю полость 5 замкового пальца 6, короткий канал 7, полость опоры 8. Канал по оси цапфы 11 и нижняя полость 13 замкового пальца 6 заполнены воздухом при атмосферном давлении, поскольку впускной клапан 12 не позволяет проникнуть туда смазочному материалу при штатной вакуумной закачке смазочного материала. При этом в качестве смазочного материала закачивают смазочное масло с антизадирными присадками. Смазочное масло имеет достаточно высокую вязкость, чтобы обеспечивать возможность его перемещения в системе смазки, и достаточно малую вязкость, чтобы предотвратить его самопроизвольное просачивание через герметизирующие уплотнения.

Во время работы долота снаружи на эластичную диафрагму 2 через канал 20 действует давление, превышающее атмосферное давление внутри канала по оси цапфы 11 и нижней полости 13 замкового пальца 6. Данное избыточное давление открывает впускной клапан 12, в результате

чего отработавшая смазка из полости опоры 8 начинает поступать в канал по оси цапфы 11 и далее в нижнюю полость 13 замкового пальца 6. При этом в полость опоры начинает поступать новая порция смазочного материала из полости 3 масляного резервуара. Отработавший смазочный материал, содержащий продукты износа за счет центробежных сил, создаваемых вращением долота перемещается из канала по оси цапфы 11 в нижнюю полость 13, накапливаясь вблизи выпускного клапана 15. В процессе перемещения отработавшего смазочного материала от впускного клапана 12 к выпускному клапану 15 он проходит через постоянный магнит 14, на котором осаждаются продукты износа, что устраняет возможность заклинивания выпускного клапана 15. При заполнении канала по оси цапфы 11 и нижней полости 13 замкового пальца 6 происходит частичное сжатие гидроаккумулятора 21 пока давление на его поршне со стороны пружины и снаружи не станут равны давлению в затрубном пространстве. В процессе бурения скважины происходит постоянный рост давления в затрубном пространстве за счет опускания долота вниз и, соответственно увеличения высоты столба бурового раствора в затрубном пространстве. Это обеспечивает поступление смазочного материала в полость опоры 8. Кроме того, при поднятии долота, а также вследствие пульсации давления в затрубном пространстве возможно длительное или кратковременное превышение давления запасенного в гидроаккумуляторе в канале по оси цапфы 11 и нижней полости 13 замкового пальца 6 величины давления в затрубном пространстве. При этом произойдет открытие выпускного клапана 15 с выбросом отработавшего смазочного материала из системы смазки наружу.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СМАЗКИ

Разработанная методология состоит из пяти этапов, необходимых и достаточных для научно обоснованного проектирования системы смазки долот с герметизированными опорами.

Этап 1. Анализ работоспособности смазки

На данном этапе определяются два важнейших показателя долотных смазок – несущая способность $P_{кр}$, характеризующая антизадириные свойства смазочного материала, и противозносные свойства, определяемые по скорости линейного изнашивания материалов опор буровых долот. Особенностью данных испытаний является необходимость проведения испытаний в условиях идентичных режимам эксплуатации опор буровых долот (контактные давления до 70 МПа, температура $80 \pm 20^\circ\text{C}$), т.е. фактически требуется провести испытания на трибологиче-

скую совместимость смазок с материалами, из которых изготавливаются опоры, а конкретнее – с антизадириными серебряными покрытиями, которые широко используют в отечественном и зарубежном долотостроении. Износ или задири серебряного покрытия вызывает отказ (заклинивание) опоры.

Оценка несущей способности выполняется по методике испытаний на трение скольжения по схеме «кольцо-кольцо» при ступенчато-возрастающей нагрузке. Критическая нагрузка определяется по возникновению прихватов, выявляемых в виде «скачков» момента трения на эпюре его изменения во времени (рис. 3).

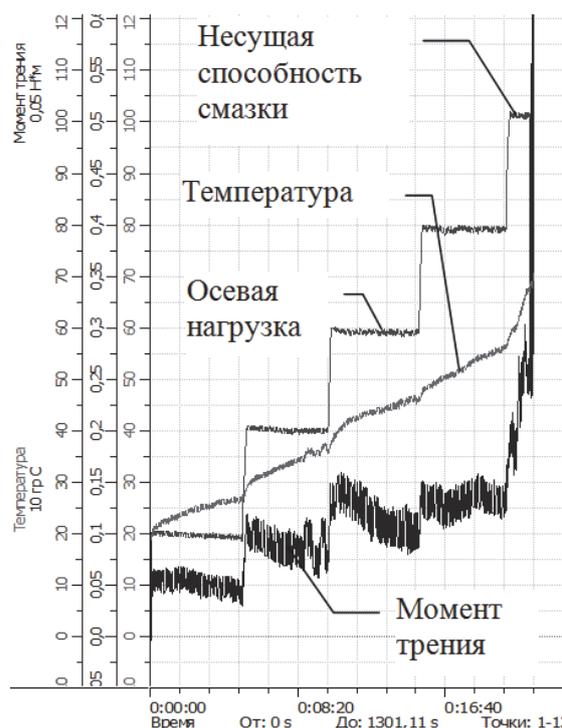


Рис. 3. К методике оценки несущей способности смазки

Износостойкость определяется по максимальному значению линейного износа на дорожке трения за один час испытаний при эксплуатационной удельной нагрузке на контакт.

Следует отметить, что в настоящее время не существует ни одного стандарта, позволяющего получать адекватные характеристики износостойкости и задиристости долотных смазок. Поэтому результаты стандартных испытаний данных смазок, например, на четырехшариковой машине трения практической ценности не имеют. Для проведения испытаний требуется разработка уникальных испытательных стендов. Для смазок, не показавших работоспособность на данном этапе исследований, дальнейшее проектирование смазочной системы нецелесообразно.

В лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ и исследовательской лаборатории ОАО «Волгабурмаш» было установлено, что

наиболее перспективными среди ряда долотных смазок обладают консистентные смазки JBL-713R (фирма Tomlin, США), Probe A, Probe C (фирма Veghem, Германия). Испытания смазок на совместимость с материалами и покрытиями, используемыми в опорах буровых долот при условиях, имитирующих трение в опорах при работе долота на забое, проводили на компьютеризированном трибометре «Универсал-1А» при следующих режимах: схема испытаний – «кольцо-плоскость»; среда – испытуемые пластичные смазки; давление – до 200 МПа; пара трения – «долотная сталь (вращающийся образец, HRC 45) – исследуемое покрытие»; частота вращения – от 600 мин⁻¹; площадь поверхности трения – 15 мм²; приведенный диаметр поверхности трения – 5,5 мм; вид трения – граничное.

Этап 2. Анализ физико-механических свойств смазки

Необходимость данного этапа обусловлена тем, что производители смазочных материалов, как правило, не предоставляют своим заказчикам всех необходимых данных о смазочных материалах, необходимых для проектирования системы смазки. Одной из важнейших характеристик смазок, необходимой для расчета последующих параметров является их плотность $\rho_{см}$. Для ее оценки использована методика, в которой внутреннюю полость металлической трубки набивают испытуемой смазкой. Далее определяют плотность смазки по разнице массы трубки до и после набивки смазочного материала и величине объема внутренней полости трубки. Взвешивание производят на электронных весах с точностью 0,1 мг.

Далее необходимо оценить коэффициент объемного расширения смазки β в диапазоне эксплуатационных температур. Поскольку система смазки в опорах герметизирована отсутствие учета данной величины, как было отмечено выше, чревато разрушением диафрагмы. Поэтому после полной заправки долота часть объема смази V_k следует выкачать обратно, т.е. создать искусственный «дефицит» смазки, достаточный для компенсации ее теплового расширения. В настоящее время проблема теплового расширения смазки решается путем прокалывания диафрагмы с тем расчетом, что «лишняя» смазка при нагреве выйдет через прокол наружу, что является примером нерационального расходования дорогостоящих смазок.

Для оценки потребной скорости обновления смазочного материала q в зоне трения опоры скольжения предлагается оригинальная методика, которая заключается в предварительной оценке удельной (отнесенной к площади поверхности трения S) толщины h_3 граничного слоя смазочного материала, находящегося между поверхностями трения при эксплуатационных значениях кон-

тактного давления и средней температуры, а также долговечности граничного слоя смазочного материала t_p с учетом условий эксплуатации опор буровых долот.

Для определения толщины смазочного слоя в условиях граничного трения, когда толщина смазки соизмерима с шероховатостью поверхностей трения, а сближение поверхностей под нагрузкой осуществляется, в том числе за счет смятия наиболее высоких выступов поверхностей без разрушения граничного слоя, используется метод взвешивания образцов, вырезанных из реальной пары трения, между которыми нанесен слой испытуемой смазки. После нагружения такой пары образцов эксплуатационной нагрузкой часть смазки выдавится по краям образцов. После удаления выдавленной части смазки образцы разгружают и взвешивают. По разнице массы сухих образцов и образцов после их смазки и нагружения определяют массу смазки $m_{см}$, оставшейся в зоне контакта образцов. Далее эффективную удельную толщину смазочного слоя можно рассчитать как

$$h = m_{см} / (\rho S) \text{ [мкм]}. \quad (1)$$

Средние значения толщины смазочного слоя h_3 при давлении 60 МПа для долотных смазок близки и составляют 8...12 мкм.

Вследствие трибодеструкции молекул смазочного материала и расходования активных компонентов присадок защитные свойства однократно нанесенного граничного слоя постепенно ослабевают и если не обеспечена возможность обновления смазочного материала в зоне трения через определенное время наступает схватывание поверхностей трения. Знание величины долговечности t_p граничного слоя смазки в заданных условиях эксплуатации узла трения позволит рассчитать потребную скорость обновления смазки в опоре q , обеспечивающую гарантированную работоспособность смазки в течение заданного срока службы опоры T_c . Разумеется, на величину t_p помимо свойств смазки и условий работы, влияние также оказывает толщина смазочного слоя и маслоемкость поверхностей трения, зависящая от их микрогеометрии. Величина t_p определяется как среднее время от начала испытания натурной пары трения при наличии между ними слоя смазки толщиной h_3 до начала прихватывания пары трения (рис. 4).

При данных испытаниях излишки смазки, выдавленные из зоны трения после нагружения деталей, удаляются с целью предотвращения попадания в зону трения новой порции смазки. После этого определяют требуемую величину скорости обновления смазки в опоре как отношение

$$q \geq m_{см} / t_p = \rho h_3 S / t_p, \text{ [г/с]}. \quad (2)$$

С учетом того, что

$$T_c = M_{см} / q = \rho V_{см} / q, \text{ [с]}, \quad (3)$$

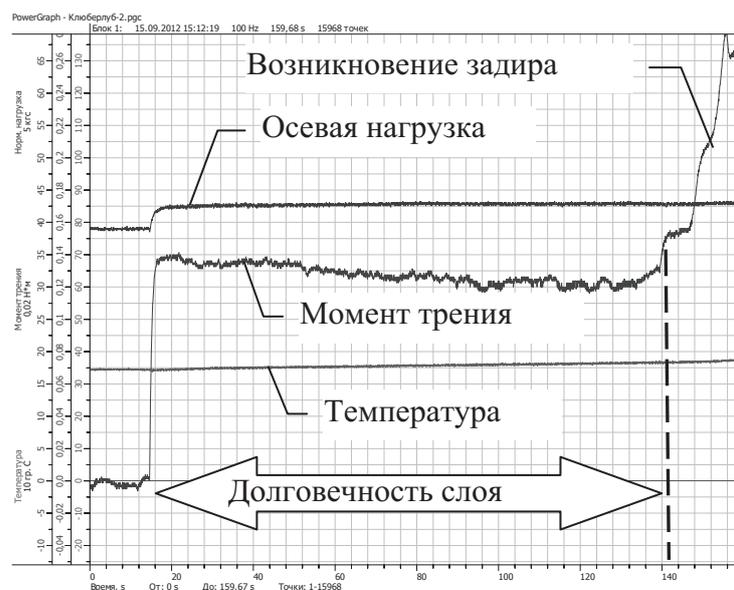


Рис. 4. Иллюстрация методики оценки долговечности слоя

следует

$$V_{см} = \frac{T_c q}{\rho} = \frac{T_c h S}{t_p}, \quad [M^3], \quad (4)$$

где ρ – плотность смазочного материала; $M_{см}$ и $V_{см}$ – соответственно потребные масса и объем смазки в смазочной системе для обеспечения работоспособности узла трения в течение заданного срока службы T_c ; S – площадь поверхности трения.

Найденное по формуле (2) значение q является основой для выбора системы расположения и сечения смазочных каналов в опорах буровых долот с принудительной системой смазки на следующем этапе.

Основные свойства наиболее перспективных долотных смазок, определенные по предлагаемым методикам, приведены в табл. 1.

Этап 3. Расчет параметров системы смазки опор

На данном этапе задаются требуемым техническим ресурсом опоры T_c и рассчитывают потребный объем (или массу) смазочного материала

в смазочной системе $V_{см} \geq T_c q$ [мм³]. Следует отметить, что в современных долотах объем смазки, закачиваемой в смазочную систему, значительно превышает потребный расчетный объем $V_{см}$. Далее определяют минимальный полный объем смазочной системы $V_{св}$ как сумму объема, занятого смазкой $V_{см}$ и компенсационного объема $V_{к}$, не занятого смазкой.

Этап 4. Разработка технологии заправки и эксплуатации смазочной системы долота

Для каждой смазки определяется давление закачки смазки в собранную опору и разрабатывается стратегия управления подачей смазки в опору при эксплуатации долота на забое за счет подъема-опускания долота; за счет изменения давления промывочной жидкости и (или) за счет дозаправки смазки после подъема долота при многократном его использовании. Первые два метода основаны на использовании изменения гидростатических сил, действующих на смазочный материал. Разработанная стратегия записывается в инструкции по эксплуатации долота.

Таблица 1. Результаты испытаний долотных смазок по оценке плотности ρ , эффективной толщины смазочного слоя h_3 (при нагрузке 60 МПа), коэффициента объемного расширения β при 70...90°C, долговечности граничного слоя смазки t_c , энергии активации течения смазки U_0

Характеристики смазок	Марки пластичных долотных смазок				
	JBL	Proba A	KluberTemp	KluberLube	Proba C
ρ , кг/м ³	1375	888	2200	947	905
h_3 , мкм	13,98	12,99	8,74	8,12	4,23
β	0,002902	0,001587	0,00235	0,00088	0,00106
t_c , с	1200	450	20	200	600
U_0 , кДж/моль	30	18	33	32	19

Этап 5. Опытнo-промышленные и промышленные испытания долот с новой системой смазки

Комплекс исследований на данном этапе включает известные методы натурных, опытнo-промышленных и промышленных испытаний. Критерием работоспособности разработанной системы смазки служит превышение найденного при испытаниях технического ресурса заданной величины, диктуемой потребностями рынка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция системы смазки опор буровых долот, обеспечивающая при работе долота поступление в зону трения смазочного материала из резервуара и удаление отработавшего масла из системы смазки долота.

Предложена методология проектирования

системы смазки, объединяющая совокупность методик оценки физико-механических и триботехнических свойств смазочных материалов, методов компьютерного моделирования и анализа внешних и внутренних сил, действующих на смазку, способов управления работой смазочной системы в процессе эксплуатации долота. Приведенные результаты исследования характеристик перспективных долотных смазок указывают на то, потребное количество смазки, методика ее заправки в долото и скорость прокачивания через опору могут существенно отличаться, что требует индивидуального проектирования системы смазки для каждой марки используемого смазочного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2495218 «Система смазки бурового шарошечного долота с герметизированными опорами».

METHODOLOGY OF DESIGN OF THE PRESSURIZED SYSTEMS OF GREASING WITH COMPULSORY SUPPLY OF LUBRICANT

© 2016 S.A. Belokorovkin, I.D. Ibatullin, D.R. Zagidullina

Samara State Technical University

The advanced design of a sliding friction pairs of drill bits with compulsory supply of lubricant is given in the report. The system of greasing provides continuous updating of lubricant in a support from the tank and removal of the fulfilled greasing from a bearings in the processe of drilling. The methodology of calculation of system of greasing of bearings of the drill bits is shown in the report, considering properties of lubricant, chisel service conditions, and also constructional materials and the coverings used in a friction surfaces.

Keywords: sliding friction pairs, methodology of design of system of greasing, drill bits.

Sergey Belokorovkin, Graduate Student at the Mechanical Engineering Technology Department.

E-mail: id_ildar@mail.ru

Ildar Ibatullin, Doctor of Technics, Professor at the Mechanical Engineering Technology Department.

Dinara Zagidullina, Graduate Student at the Mechanical Engineering Technology Department.