

УДК 622.243.1

**РАСЧЕТ ПРИЖИМАЮЩЕГО УСИЛИЯ В СКВАЖИНЕ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ВЛИЯНИЯ  
НА СИЛУ ТРЕНИЯ МЕЖДУ ГОРНОЙ ПОРОДОЙ  
И БУРИЛЬНЫМИ ТРУБАМИ В СРЕДЕ РАЗЛИЧНЫХ  
ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

**CALCULATION IN WELL DOWNFORCE AND EXPERIMENTAL  
SUBSTANTIATION OF ITS INFLUENCE ON THE FRICTION  
BETWEEN THE CASING AND DRILL PIPES IN ENVIRONMENT  
THE VARIOUS MUD FLUID**

**Салихов И. Ф.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический  
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

**I. F. Salikhov**

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,  
Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: SalikhovIF@rusoil.net**

**Аннотация.** Прихват обсадных и бурильных труб представляет наибольшую опасность в технологическом процессе строительства скважин, приводящую зачастую к полной ликвидации скважин. Основными причинами прихвата принято считать шероховатость поверхностей соприкасающихся тел, а также молекулярное притяжение, действующее в местах контакта трущихся тел.

Согласно второму закону трения Кулона величина трения покоя пропорциональна силе нормального давления, однако данное утверждение справедливо для условий сухого трения и для описания характеристик

трения между жидко-пластичным веществом (фильтрационной коркой) и твердой фазой (металлом труб) требуются дополнительные лабораторные исследования. С целью обеспечения условий, приближенных к скважинным, в данной статье была определена граница максимальных значений прижимающего усилия для четырех интервального профиля ствола скважины, возникающих при выполнении спускоподъемных операций. С учетом расчетных значений нормального прижатия проведена серия опытов и установлена зависимость показателей трения при движении металла труб по породе в среде оптимальных рецептур исследованных жидкостей от величины прижимающего усилия.

Полученные результаты расчетов легли в основу дополнительных исследований влияния различных промывочных жидкостей на коэффициенты трения между замком бурильной трубы и горной породой в зависимости от удельного прижимающего усилия между ними. Исследования проводились на модифицированной экспериментальной установке АИ-3М, позволяющей моделировать схему взаимодействия «металл замка труб – стенка скважины».

**Abstract.** Sticking of casing and drill pipes constitutes the greatest danger in technological process of wells construction, which often leads to a complete abandonment of well. It is considered that the main reasons of a sticking are roughness surfaces of the friction bodies and the molecular attraction operating in places of contact of the rubbing bodies.

According to the Coulomb's second law of friction the size of static friction is proportional the force of normal pressure, however this statement is fair for conditions of dry friction and for the description of friction characteristics between liquidly - plastic substance (mud cake) and a firm phase (metal of pipes) additional laboratory researches are required. For the purpose of providing the conditions approached to borehole the limit of the maximum values of the pressing effort for a four-interval profile of borehole occur during drilling tool round trip was defined in this article. Taking into account calculated

values of normal pressing a series of experiences is carried out and dependence of friction indicators during movements of metal of pipes on rock in the environment of optimum compoundings of the studied liquids from the size of the pressing effort is established.

The results formed the basis for the calculation of additional research of influence of various drilling fluids on the coefficients of friction between the drill pipe and Castle Rock, depending on the specific efforts of holding between them. Studies were carried out on the modified experimental installation of AI-3 m, which allows to simulate the interaction diagram "metal pipes-castle wall wells».

**Ключевые слова:** усилие прижатия, противоприхватные свойства, интенсивность искривления, коэффициент трения, промывочная жидкость.

**Key words:** pressing effort, antistick properties, deviation rate, friction coefficient, mud fluid.

Согласно исследованиям ряда ученых, прихваты бурильных и обсадных колонн в открытом стволе скважины обусловлены молекулярно-механическим взаимодействием металла труб с фильтрационной коркой стенки скважины [1, 2, 3], причем вероятность возникновения прихватов напрямую зависит от величины прижимающего усилия. Прижимающее усилие возникает как за счет составляющих веса колонны к плоскости контакта, так и за счет перепада давления (1):

$$F_{\text{общ.}} = F_{\text{вог./вып.}} + F_{\text{давл.}} \quad (1)$$

где  $F_{\text{общ.}}$  – общее прижимающее усилие;

$F_{\text{вог./вып.}}$  – прижимающая сила на участках вогнутой/выпуклой формы;

$F_{\text{давл.}}$  – прижимающее усилие под действием репрессии на пласт.

Произведем расчет максимального усилия прижатия бурильной колонны к стенке ствола скважины четырех интервального (S-образного) профиля искривленного в одной плоскости с постоянной интенсивностью искривления при движении колонны труб вверх (рисунок 1).

В качестве бурильной колонны примем 127-мм колонну с комбинированной высадкой концов (ТБПК 127x9,19) группы прочности стали Л, согласно ТУ 14-3-1571–88. Вес единицы длины колонны труб по стволу скважины  $q = 350 \text{ Н/м}$ , наружный диаметр замка  $d_3 = 0,162 \text{ м}$ , длина замка бурильных труб  $l_3 = 0,43 \text{ м}$ , вес, приложенный к нижнему концу труб  $Q_{н1} = 100 \text{ кН}$ , угол искривления на конце первого участка искривления  $\alpha_1 = 15^\circ$ , на конце второго участка –  $\alpha_2 = 45^\circ$ , длины участков  $l_1 = l_2 = l_3 = 1000 \text{ м}$ ,  $f = 0,2$ . Диаметр скважины с учетом кавернозности  $D_c = 0,246 \text{ м}$ . Репрессия на проницаемый пласт  $\Delta P = 3,0 \text{ МПа}$ .

Для начала рассчитаем прижимающее усилие колонны труб на стенку скважины под действием собственного веса.

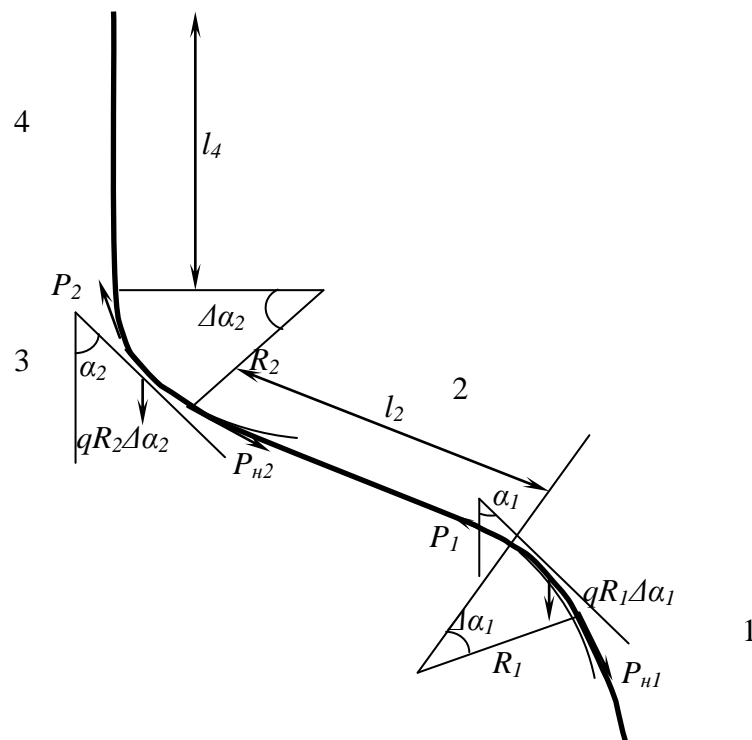


Рисунок 1. Профиль четырех интервального ствола скважины

Согласно [1, С.32] величина усилия прижатия элемента бурильных и обсадных труб к стенке скважины под действием веса колонны труб на наклонном участке при пространственном искривлении равна геометрической сумме нормальной составляющей силы веса и прижимающей силы под действием текущих натяжений, приложенных к концам отрезка пространственной кривой. Причем, на выпуклом участке искривления направление этих сил совпадает, на вогнутом они направлены в противоположные стороны (2):

$$F_{\text{вог./вып.}} = \sqrt{F_p^2 + F_q^2 \mp \frac{2}{A} \cdot F_p \cdot F_q} \quad (2)$$

где  $F_p$  – составляющая прижимающей силы под действием текущих натяжений колонны труб (осевых сил);

$F_q$  – составляющая прижимающей силы от действия нормальной составляющей веса труб.

Из выражения (2) видно, что наибольшее прижимающее усилие элемента трубы к стенке скважины возникает на выпуклом участке искривления профиля. На рисунке 1 выпуклый участок четырех интервального ствола скважины расположен на участке падения зенитного угла и относится к первому участку.

Нагрузка, приложенная к нижнему концу колонны труб на рассматриваемом участке, находится по формуле (3):

$$P_{н1} = Q_{н1} \cos \alpha_1 = 100000 \cdot 0,9659 = 96,59 \text{ кН.} \quad (3)$$

По формуле (4) находим радиус участка искривления на первом участке:

$$R_1 = \frac{57,3 \cdot \Delta l_1}{\Delta \alpha_1} = \frac{57,3 \cdot 1000}{30} = 1910 \text{ м} \quad (4)$$

где  $\Delta \alpha_1$  – разность углов искривления на границах участка длиной  $\Delta l_1$ .

Прирост нагрузки от веса колонны  $B$  на рассматриваемом интервале находим по формуле (5):

$$B_1 = q \cdot R_1 \cdot \Delta \sin \alpha_1 = 350 \cdot 1910 \cdot (\sin 45^\circ - \sin 15^\circ) = 299,69 \text{ кН.} \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления при движении колонны труб в скважине находим по формуле (6):

$$f = \mu + \frac{f_0}{\sigma_1} \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения для условий скважины, учитывающий одновременно несовпадение осей скважины и труб;

$f_0$  – параметр, учитывающий наличие сопротивлений, которые не зависят от прижимающей силы (сопротивление со стороны жидкости), либо зависят лишь косвенно (адгезионные сопротивления, сопротивления, встречаемые бурильными замками и др.).

$\sigma_1$  – приращение искривления на рассматриваемом участке ствола скважины (угол обхвата участка ствола скважины колонной бурильных труб).

Помножив левую и правую часть выражения (6) на  $\sigma_1$  получим уравнение (7):

$$\sigma_1 f = \sigma_1 \mu + f_0 \quad (7)$$

Приращение искривления на первом участке ствола скважины  $\sigma_1$  находим по формуле (8):

$$\sigma_1 = \sqrt{\Delta \alpha_1^2 + (\Delta \varphi_1 \cdot \sin \alpha_{1cp})^2} \quad (8)$$

где  $\alpha_{1cp}$  – среднеарифметическое углов искривления на верхней и нижней границе участка длиной  $\Delta l_1$ .

Так как искривление происходит в плоскости, то азимутальное изменение на границах участка  $\Delta \varphi_1 = 0^\circ$  и выражение (8) примет вид:

$$\sigma_1 = \sqrt{\Delta\alpha_1^2} = \Delta\alpha_1 \quad (9)$$

По формуле (10):

$$\sigma_1 f = \Delta\alpha f = \frac{30}{57,3} \cdot 0,2 = 0,105 \quad (10)$$

Из таблицы приложения [1, С.141], интерполируя, находим:

$$(\psi_4 - 1)_1 = 0,0547$$

$$(\psi_2 - 1)_1 = 0,1175,$$

где  $\psi_2, \psi_4$  – безразмерные коэффициенты.

Сила сопротивления при движении колонны труб вверх находим по формуле (11) [1, С.10]:

$$T_{1\text{вв}} = B_1 \cdot (\psi_4 - 1) + C_1 \cdot (\psi_2 - 1) = 299,69 \cdot 0,0547 + 96,59 \cdot 0,1175 = 27,74 \text{ кН} \quad (11)$$

где  $T_{1\text{вв}}$  – сила сопротивления при движении колонны труб вверх на участке падения зенитного угла;

$C_1$  – нагрузка, приложенная к нижнему концу колонны или ее выделенной части.

Из выражения (12) найдем прижимающие силы, найденные по методу осевых сил в процессе движения колонны труб вверх:

$$F_{1\text{рвр}} = \frac{T_{1\text{вв}}}{f} = \frac{27,74}{0,2} = 138,7 \text{ кН} \quad (12)$$

Составляющую прижимающей силы от действия нормальной составляющей веса труб для первого участка, который может быть принят за дугу окружности, получим, преобразовав выражение (5):

$$F_{1q} = q \cdot l_1 \sin\alpha = q \cdot R_1 \cdot \Delta\cos\alpha = 350 \cdot 1910 \cdot (0,9659 - 0,7071) = 173,01 \text{ кН} \quad (13)$$

По формуле (14) найдем «исправленное» значение члена  $F_{1q}$  на искривленном участке ствола скважины, учитывающее возникновение и действие изменения силы сопротивления при движении вверх:

$$F_{1qvv} \approx F_{1q} \cdot [1 + 0,5 \cdot (\psi_2 - 1)] = 173,01 \cdot [1 + 0,5 \cdot 0,1175] = 183,17 \text{ кН} \quad (14)$$

Так как искривление происходит в плоскости, то  $A = 1$ . Из формулы (2) находим результирующую прижимающую силу на первом участке ствола скважины в процессе движения колонны вверх:

$$F_1 = F_{\text{вып.}} = \sqrt{138,7^2 + 183,17^2 + \frac{2}{1} \cdot 138,7 \cdot 183,17} = |183,17 + 138,7| = 321,87 \text{ кН.}$$

В реальных условиях наибольшая интенсивность взаимодействия колонны труб со стенкой скважины осуществляется в районе замков труб. Примем случай, когда взаимодействие металла труб со стенкой скважины осуществляется только на границе контакта замков обсадной колонны и стенки скважины.

На рисунке 2 изображено взаимодействие замка колонны 1 с фильтрационной коркой 2 стенки скважины 3.

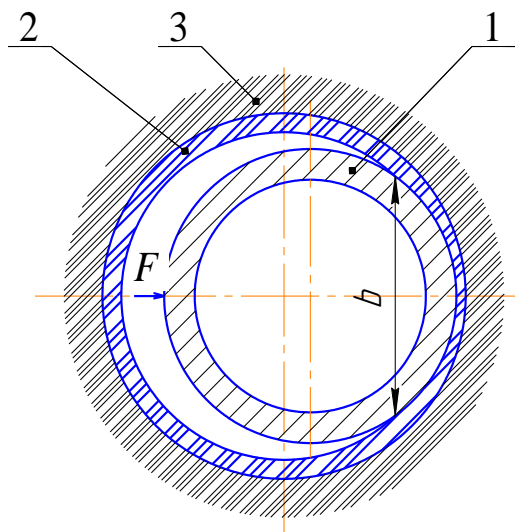


Рисунок 2. Схема взаимодействия замка обсадной колонны с фильтрационной коркой стенки скважины

Так как прижимающее усилие  $F_{\text{общ.}}$  равномерно распределено по поверхности контакта между замками обсадной колонны 1 и фильтрационной коркой 2 стенки скважины 3 по всей длине первого участка, то формула (1) преобразуется в выражение (15):



$$F_{\text{уд.общ.}} = \frac{F_{\text{вог./вып.}}}{n \cdot S} + \Delta P \quad (15)$$

где  $n = 84^2$  – количество замков бурильных труб на рассматриваемом интервале.

Площадь взаимодействия  $S$  замка бурильной трубы с фильтрационной коркой стенки скважины находим по формуле (16):

$$S = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot l_3}{360} \cdot \alpha \quad (16)$$

где  $\alpha$  – центральный угол (угол контакта), примем  $\alpha = 60^\circ$  [2, С.26].

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,162 \cdot 0,43}{360} \cdot 60 = 0,0365 \text{ м}^2$$

Воспользуемся формулами (15) и (16) и найдем общее удельное усилие прижатия замка бурильной колонны к стенке скважины.

$$F_{\text{уд.общ.}} = \frac{321,87 \cdot 10^3}{84 \cdot 0,0365} + 3,0 \cdot 10^6 = 3104,98 \text{ кН/м}^2 \approx 310,5 \text{ Н/см}^2$$

Как видно из проведенных выше расчетов составляющая усилия прижатия от перепада давления во много раз превосходит составляющую от веса колонны труб.

Полученные результаты расчетов легли в основу дополнительных исследований влияния различных промывочных жидкостей на коэффициенты трения между замком бурильной трубы и горной породой в зависимости от удельного прижимающего усилия между ними. Исследования проводились на модифицированной экспериментальной установке АИ-3М, позволяющей моделировать схему взаимодействия «металл замка труб – стенка скважины» [4, 5, 6, 7].

На образец горной породы (песчаник), помещенный в среду исследуемых жидкостей, металлическим образцом создавалась удельная

нагрузка в диапазоне от 261,5 до 632,5 Н/см<sup>2</sup>. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода, а также полимерглинистый буровой раствор (ПГБР) и безглинистый биополимерный раствор (ББР), состав и параметры свойств которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Состав и параметры свойств ПГБР и ББР

Тип раствора	Состав раствора	Параметры свойств раствора							
		$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	УВ, с	$\eta$	$\tau_0$	ПФ, см <sup>3</sup> /30мин	$\mu_{ст.}$ (10 мин)	$\mu_{дин.}$ (10 мин)	$F_{уд. адг.}$ (10 мин)
ПГБР	Вода + 6% ПБМА + 4,67% СаСО <sub>3</sub> + 0,275% ПАЦ-ВВ + 1,5% БКР-5	1080	27,2	12,2	31,68	7	0,121	0,098	0,108
ББР	Вода + 0,25% ПАЦ-ВВ + 0,17% Гаммаксан+13% СаСО <sub>3</sub> + 0,1%бактерицид + 0,96% БКР-5	1070	51,4	13,0	45,52	7	0,242	0,194	0,098

На графике 3 представлены значения статического  $\mu_{ст.}$  и динамического  $\mu_{дин.}$  коэффициентов трения системы «металл-горная порода» в различных средах в зависимости от удельного усилия прижатия между ними.

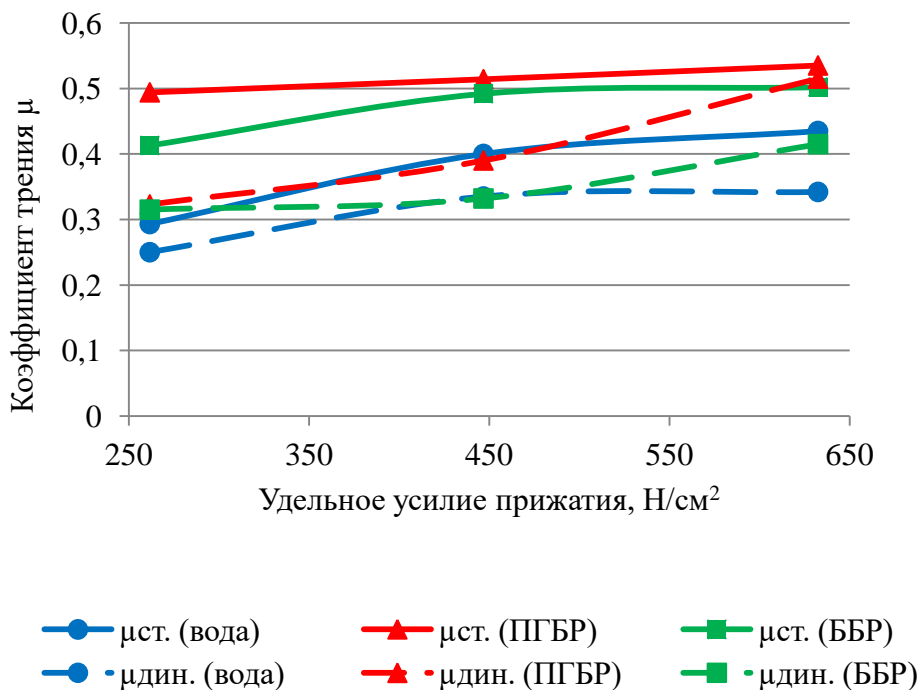


Рисунок 3. Влияние различных промывочных жидкостей на статический  $\mu_{ст.}$  и динамический  $\mu_{дин.}$  коэффициенты трения системы «металл – горная порода» в зависимости от удельного усилия прижатия

Анализ результатов опытов говорит о том, что в рассматриваемом диапазоне возникающих максимальных удельных усилий прижатия в скважине наблюдается прямое влияние его значений на величину коэффициента трения, независимо от типа исследуемых жидкостей.

Однако, при меньших удельных нагрузках на статический  $\mu_{ст.}$  и динамический  $\mu_{дин.}$  коэффициенты трения в системе «металл – горная порода» существенное влияние также могут оказать и характеристика поверхности горной породы (шероховатость) и свойства применяемого бурового раствора (условная вязкость, фракционный состав твердой фазы и т. д.), что может изменить полученную картину трения (рисунок 3).

### **Выводы**

Таким образом, полученная закономерность влияния прижимающего усилия в скважине на силу трения между горной породой и бурильными трубами в среде различных промывочных жидкостей требует более углубленного изучения с расширением диапазона удельных усилий и выявлением факторов, существенно влияющих на процесс трения.

### **Список используемых источников**

- 1 Александров М. М. Взаимодействие колонн труб со стенками скважины. М.: Недра, 1982. 144 с.
- 2 Шерстнев Н. М., Расизаде Я. М., Ширинзаде С. А. Предупреждение и ликвидация осложнений в бурении. М.: Недра, 1979. 304 с.
- 3 Гержберг Ю. М. Сравнительная оценка результатов применения основных мероприятий по предупреждению прилипания компоновки низа бурильной колонны // Бурение и нефть. 2015. № 2. С. 58-61.

4 Совершенствование методики регистрации силовых параметров работы системы «металл – горная порода» при бурении скважин / А. Р. Яхин, И. Ф. Салихов, Р. А. Исмаков, Р. Г. Гимаев // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. № 4. С.30-40. URL: [http://ogbus.ru/authors/Yakhin/Yakhin\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/Yakhin/Yakhin_2.pdf) (дата обращения 09.02.16).

5 Способ определения статистических характеристик коэффициента бокового распора пласта пористой горной породы / А. Н. Попов, Н. Н. Головкина, Р. А. Исмаков, М. А. Попов: пат. № 2184232 РФ. Бюл. 2003. № 24.

6 А.С. № 1104144 СССР. Смазка для герметизированных маслonaполненных опор шарошечных долот / Г. В. Конесев, Р. А. Мулюков, М. Р. Мавлютов, А. И. Спивак, Р. А. Исмаков и др. // Оpubл. 23.07.84 // Изобретения 1984. № 27.

7 Способ определения качества моторного масла / Р. М. Ишмаков, В. И. Васильев, А. Р. Хафизов, М. Ю. Абызгильдина: пат. № 2117287 РФ. 2008.

## References

1 Aleksandrov M. M. Vzaimodeistvie kolonn trub so stenkami skvazhiny. M.: Nedra, 1982. 144 s.

2 Sherstnev N. M., Rasizade Ya. M., Shirinzade S. A. Preduprezhdenie i likvidaciya oslozhnenii v bureanii. M.: Nedra, 1979. 304 s.

3 Gerzhberg Yu. M. Sravnitel'naya ocenka rezul'tatov primeneniya osnovnyh meropriyatii po preduprezhdeniyu prilipaniya komponovki niza buril'noi kolonny // Burenie i neft'. 2015. № 02. S. 58-61.

4 Sovershenstvovanie metodiki registracii silovyh parametrov raboty sistemy «metall - gornaya poroda» pri bureanii skvazhin / A. R. Yahin, I. F. Salihov, R. A. Ismakov, R. G. Gimaev // Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurn. 2013. № 4. S. 30-40. URL: [http://ogbus.ru/authors/Yakhin/Yakhin\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/Yakhin/Yakhin_2.pdf) (data obrasheniya 09.02.16).

5 Sposob opredeleniya statisticheskikh harakteristik koefficienta bokovogo raspора plasta poristoi gornoj porody / A. N. Popov, N. N. Golovkina, R. A. Ismakov, M. A. Popov. Pat. № 2184232 RF. Byul. 2003. № 24.

6 A.S. № 1104144 SSSR. Smazka dlya germetizirovannykh maslonapolnennykh opor sharoshechnykh dolot / G. V. Konesev, R. A. Mulyukov, M. R. Mavlyutov, A. I. Spivak, R. A. Ismakov i dr. // Opubl. 23.07.84 // Izobreneniya 1984. № 27.

7 Sposob opredeleniya kachestva motornogo masla / R. M. Ishmakov, V. I. Vasil'ev, A. R. Hafizov, M. Yu. Abyzgil'dina. Pat. № 2117287 RF. // Byul. 2008.

### **Сведения об авторе**

#### **About the author**

Салихов И. Ф., аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

I. F. Salikhov, Post-graduate Student of the Chair “Oil and Gas Well Drilling”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: SalikhovIF@rusoil.net