

УДК 622.243.1

**Т.О. Акбулатов**, к.т.н., доцент; **Р.А. Исмаков**, д.т.н., профессор; **И.А. Хабибуллин**, к.т.н., доцент;  
**Г.Ю. Сайфетдинова**; **В.А. Хабибуллин**, кафедра бурения нефтяных и газовых скважин,  
 Уфимский государственный нефтяной технический университет, e-mail: darik\_bur@mail.ru

## К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ НА ТРАНСПОРТ ШЛАМА ПО СТВОЛУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

*Как известно, первые скважины с горизонтальным окончанием были пробурены в 1953–1955 гг. на территории Башкирии. Толчком к дальнейшему развитию бурения горизонтальных скважин (ГС) в мире послужила успешная проводка в 1981 г. двух горизонтальных скважин на месторождении Роспе-Маре (Италия).*

В то же время, несмотря на значительный рост объемов бурения и более чем полувековой период проводки таких скважин, существуют различные мнения о влиянии реологических параметров промывочной жидкости на транспорт выбуренной породы по горизонтальному стволу скважин.

Многие исследователи [1, 2, 4] для промывки ГС рекомендуют растворы с высоким динамическим напряжением сдвига (ДНС) –  $\tau_0$  или с высокой вязкостью при низких скоростях сдвига (ВВНСС), что, в принципе, одно и то же. Но ВВНСС соответствует низкой величине показателя нелинейно-

сти –  $n$ , если жидкость описывается степенной моделью Оствальда – де Вааля.

В.И. Крыловым и В.В. Крецулом предложена формула для определения необходимого расхода промывочной жидкости для промывки ГС

$$Q = \frac{\pi \cdot (D_c^2 - D_T^2)}{0,0008 \cdot \rho \cdot (330 \cdot \eta + \tau_0) \cdot (2 - \sin \alpha)} \cdot \left( \frac{600 \cdot \eta + \tau_0}{330 \cdot \eta + \tau_0} \right)^{2,52}, \quad (1)$$

где  $D_c$ ,  $D_T$  – диаметры скважины и бурильных труб;  $\eta$ ,  $\tau_0$  – структурная вязкость и ДНС раствора;  $\alpha$  – угол наклона скважины к вертикали.

Из формулы (1) следует, что расход жидкости для горизонтального ствола должен быть в 2 раза больше, чем для вертикального, и увеличение  $\tau_0$  способствует транспорту шлама – необходимый расход при этом уменьшается.

Согласно исследованиям Кашкарова Н.Г. [2], проведенным в плоской щели, эффективный размыв песчаного осадка наблюдается при  $\tau_0 / \eta > 150 \text{ с}^{-1}$ . Следует при этом отметить, что плоская щель не моделирует эксцентричное кольцевое пространство, не учитывается эксцентриситет и в формуле (1).

В то же время известно [5, 6], что увеличение ДНС раствора может привести

Таблица 1. Реологические параметры применяемых жидкостей

Вид жидкости	Условная вязкость (УВ) по СПВ-5, с	Реологические параметры по модели				$\mu_{эф.}$ , Па·с
		Бингама $\tau_0 = \tau_0 + \eta \frac{dU}{dr}$		Оствальда – де Вааля $\tau = k \left( \frac{dU}{dr} \right)^m$		
		$\eta$ , Па·с	$\tau_0$ , Па	$k$ , Па·с <sup>m</sup>	$n$	
1. Вода	15	0,001	0	0,001	1	0,001
2. 1,0% раствор КМЦ	25	0,015	1,0	0,05	0,8	0,028
3. 1,5% раствор КМЦ	35	0,017	2,5	0,14	0,7	0,043
4. Раствор Аква-Пак	35	0,011	3,5	0,41	0,5	0,056
5. Раствор глицерина	25	0,009	0,0	0,009	1,0	0,009
6. Раствор глицерина	35	0,015	0,0	0,015	1,0	0,015

$\mu_{эф.}$  – эффективная вязкость при градиенте скорости 50 с<sup>-1</sup>



EXPOKABEL

к образованию в эксцентричном кольцевом пространстве застойных зон, что, естественно, затрудняет транспорт шлама. По мнению С. Окраджи и Дж. Дж. Азара [3], при зенитных углах  $55-90^\circ$  увеличение отношения  $\tau_0 / \eta$  не приводит к улучшению выноса шлама.

С целью разрешения указанных противоречий на кафедре бурения Уфимского государственного нефтяного технического университета были разработаны две экспериментальные установки, позволяющие исследовать процесс транспортирования твердых частиц при изменении эксцентриситета кольцевого пространства (КП) ГС при использовании жидкостей с различными реологическими параметрами [4].

Малая установка позволяла проводить исследования при различных углах наклона модели скважины к горизонтали, а большая – при вращении «бурильных труб».

В качестве промывочных жидкостей использовались вода и водные растворы КМЦ, полианионная целлюлоза ПАЦ марки Аква-Пак и глицерина, параметры которых приведены в таблице 1.

В качестве образцов шлама использовался кварцевый песок (с размерами частиц  $0,17 \div 0,2$  мм и 1 мм и плотностью  $2300 \text{ кг/м}^3$ ) и пропант ( $d=1$  мм,  $\rho=3600 \text{ кг/м}^3$ ).

Установки разрабатывались с учетом соблюдения критериев подобия геометрического, граничных условий, режимов течения и приближенного подобия критерия Архимеда.

Использование прозрачных растворов и стеклянных труб на основном участке установки позволило визуально наблюдать и фиксировать с помощью видеокамер процесс движения твердых частиц и образование осадка на нижней стенке модели скважины. В процессе экспериментов определялся минимальный расход жидкости, при котором не происходит образования осадка. Различные значения эксцентриситета КП создавались использованием различного диаметра «замков» на макете бурильных труб. При этом относительный эксцентриситет  $e$  изменялся от 0,4 до 0,67, что соответствует эксцентриситету бурильных труб в реальных скважинах

$$e = \frac{D_c - D_3}{D_c - D_m}, \quad (2)$$

где  $D_c$ ,  $D_3$ ,  $D_m$  – соответственно диаметры скважины, бурильного замка и труб.

Результаты опытов (рис. 1) показывают, что необходимый для транспорта твердых частиц расход промывочной жидкости существенно зависит от величины эксцентриситета, размеров и плотности транспортируемых частиц. В то же время были получены противоречивые результаты о влиянии вязкости растворов.

Если увеличение вязкости (как условной, так и эффективной при НСС) растворов КМЦ и Аква-Пак требовало увеличения расхода, т.е. высоковязкие растворы как бы обладали более низкой несущей способностью, то с более вязкими растворами глицерина необходимый расход уменьшался.

Нумерация линий соответствует таблице 1.

Для выяснения этого, казалось бы, парадоксального результата было исследовано распределение скоростей течения жидкости по окружности эксцентричного кольцевого пространства. Ширину зазора в эксцентричном КП (рис. 2) можно выразить зависимостью



**Высокотехнологичный кабель  
для нужд энергетики,  
атомной, нефтегазовой  
и химической  
промышленности.**

ОАО «ЭКСПОКАБЕЛЬ»:  
(495) 505-66-92, sbt@expocable.ru  
www.expocable.ru  
ЗАО «РЕКА КАБЕЛЬ»:  
(495) 543-72-45, info@rekakabel.ru  
www.rekakabel.ru

**REKA**  
CABLES

50  
1961-2011

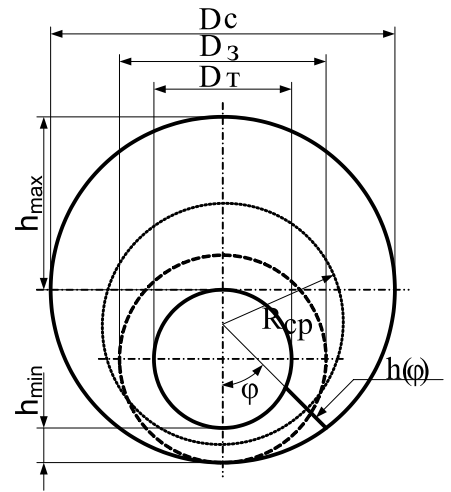


Рис. 2. Изменение величины зазора по окружности эксцентричного кольцевого пространства

$$U(\varphi) = c \cdot h^x(\varphi), \quad (4)$$

где  $x=0,57 \div 0,5$  при турбулентном режиме течения;  $x=2$  при ламинарном течении ньютоновской жидкости и  $x=(n+1)/n$  при ламинарном течении ВПЖ;  $n$  – показатель нелинейности в модели Оствальда – де Вааля. Для жидкости Бингама

$$U(\varphi) = [h^2(\varphi)/12\eta] \cdot [\Delta P/L - 2\tau_0/h(\varphi)]. \quad (5)$$

Относительная скорость течения жидкости по окружности эксцентричного кольцевого пространства определяется из выражения.

$$U_{\text{отн}} = \frac{(1 - e \cdot \cos \varphi)^x}{\left(1 + e^2 \cdot \frac{x \cdot (x+1)}{4}\right)}. \quad (6)$$

Расчитанные в соответствии с (6) распределения скоростей для различных растворов показаны на рисунке 3.

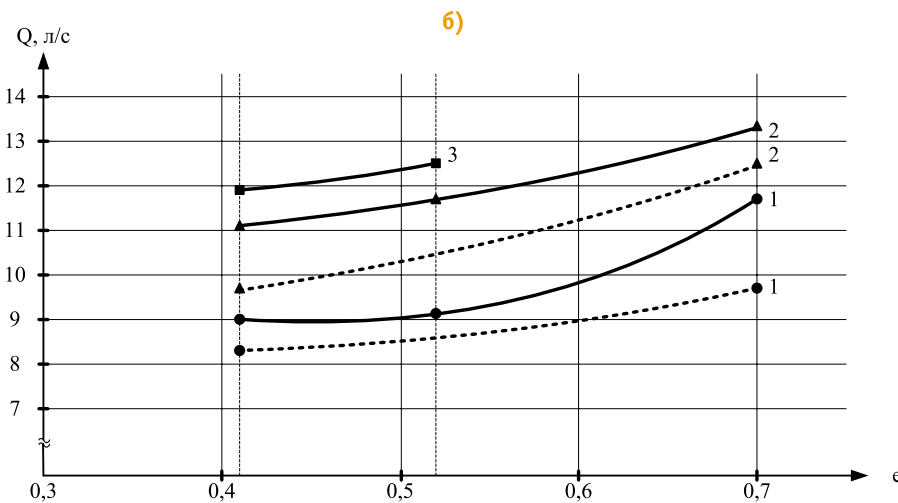
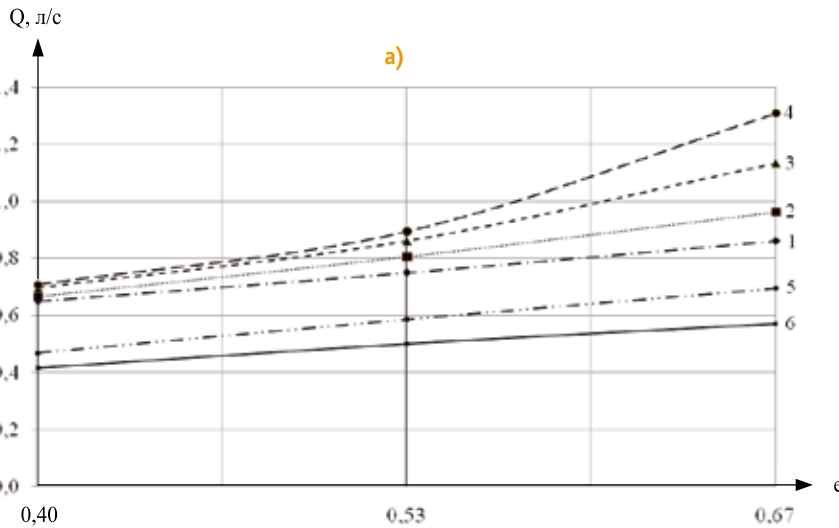


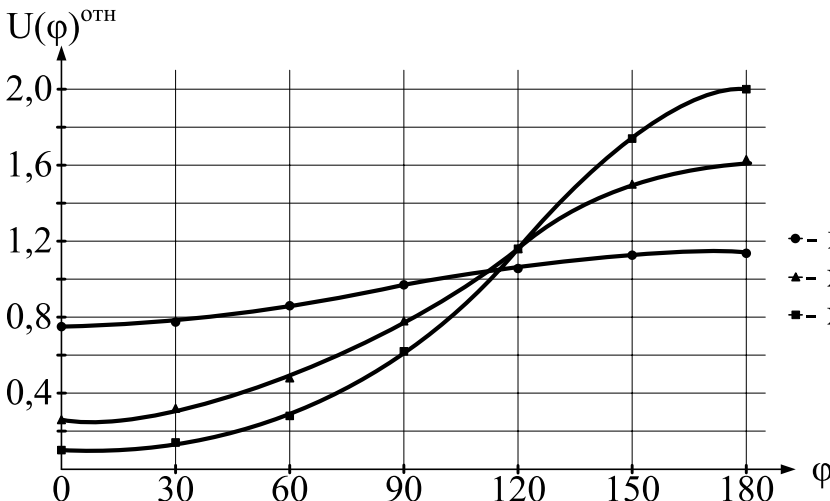
Рис. 1. Зависимости минимального расхода от эксцентриситета и свойств жидкости  
а) малая установка, кварцевый песок размером от 0,17 до 0,2 мм;  
б) большая установка, — пропант, ---- песок кварцевый размером 1 мм.

$$h(\varphi) = h_0(1 - e \cdot \cos \varphi), \quad (3)$$

где  $h_0 = 0,5(D_c - D_t)$ .  
где  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  – соответственно минимальный и максимальный размер и

$R_{\text{ср}}$  – средний радиус кольцевого пространства.

Скорость течения жидкости зависит от размера канала при прочих равных условиях согласно уравнению (4)



- ◆-  $x=0,5$  (турбулентный режим)
- ▲-  $x=2,2, n=0,8$  (ламинарный режим)
- $x=3,5, n=0,4$  (ламинарный режим)

Рис. 3. Распределение скоростей течения жидкости по окружности эксцентричного кольцевого пространства при  $e = 0,4$

Из анализа графиков на рисунке 3 видно, что чем меньше значение показателя нелинейности  $n$  (выше значение ДНС раствора), тем меньше скорость течения жидкости в нижней узкой части эксцентричного КП, где, собственно говоря, и собирается выбуренная порода (шлам), следовательно, больше необходимый для транспорта шлама расход промывочной жидкости.

Растворы с низким значением показателя нелинейности  $n$  и высоким значением ДНС имеют, как известно [3, 4, 8], плоский профиль скорости, однако это способствует лучшему транспорту шлама по стволу ГС только при концентричном (или близком к этому) расположении бурильных труб.

В то же время высокая структурная вязкость раствора при одинаковых значениях показателя нелинейности  $n$  (линии 5 и 6 на рис. 1) способствует транспорту шлама.

### ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЗВОЛЯЮТ СДЕЛАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. Необходимый для транспорта шлама по стволу ГС расход промывочной жидкости зависит от величины эксцентриситета кольцевого пространства. Эффективность транспорта шлама выше при минимальном значении эксцентриситета.
2. При турбулентном режиме разность скоростей течения жидкости в широкой и узкой частях эксцентричного кольцевого пространства минимальна, что является одной из причин более эффективного транспорта шлама.
3. Если режим течения по стволу ГС ламинарный, то при эксцентричном расположении бурильной колонны целесообразно использовать жидкости с минимальным значением ДНС и максимальной структурной вязкостью.
4. Вязкость при низких скоростях сдвига не является характеристикой несущей способности раствора.

#### Литература:

1. Крылов В.И., Крецул В.В. Гидродинамические особенности бурения горизонтальных скважин / Бурение скважин. – 2000. – №6.
2. Кашкаров Н.Г. Выбор параметров промывочной жидкости для бурения скважин / Нефть и газ. – 2001. – №3.
3. Беккер Т.Е., Азар Дж.Дж., Окраджи З. С. Зависимость выноса шлама от реологических свойств раствора при направленном бурении / Публикация 1953 г. *Special purpose entity*. – октябрь 1989.
4. Бурение горизонтальных скважин / Фирма «Бейкер Хьюз». – 1990.
5. Шищенко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промывочных жидкостей. – М.: Недра, 1976.
6. Акбулатов Т.О. Вынос частиц шлама из горизонтального ствола скважин / Нефть и газ. – 2000. – №1.
7. Маковей Н. Гидравлика бурения. – М.: Недра, 1986.
8. Хабибуллин И.А. Совершенствование процессов транспортирования выбуренной породы при бурении горизонтальных скважин / Автореферат кандидатской диссертации. – Уфа: УГНТУ, 2008.

**Ключевые слова:** горизонтальная скважина, транспорт шлама, эксцентриситет.

**BROEN  
BALLOMAX®**

Шаровые краны  
для природного газа  
и светлых нефтепродуктов

**BROEN**

INTELLIGENT FLOW SOLUTIONS



www.broen.ru