

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ НАНОЧАСТИЦ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИИ

А.В. Минаков^{1,2}, Е.И. Михиенкова¹, А. Л. Неверов¹, Ф. А. Бурюкин¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт теплофизики ИТ СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: tov-andrey@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований реологических свойств суспензий глинистых частиц с добавками наночастиц оксидов кремния, алюминия и титана. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.25 до 2% по массе. Размер частиц варьировался от 5 до 100 нм. Установлены зависимости эффективной вязкости и реологических параметров этих растворов от концентрации, размера и материала наночастиц.

Активный интерес к суспензиям с наночастицами (наножидкостям) появился четверть века тому назад и с тех пор непрерывно растет. Число публикаций, посвященных исследованию свойств и применений наножидкостей, увеличивается экспоненциально. Наночастицы в силу своих малых размеров имеют ряд необычных свойств, которые отсутствуют у макроскопических дисперсных частиц. Необычные свойства наночастиц делают нестандартными и свойства наножидкостей, в которых они являются составной частью. Это обусловило широчайший спектр применения наножидкостей [1-3]. В технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений наножидкости стали применяться существенно позднее. Однако в настоящее время области применения наножидкостей очень активно исследуются зарубежными нефтегазовыми компаниями [4]. Наножидкости стали использоваться для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений как прихват бурильной колонны. В ряде работ [5-6] показано, что добавка наночастиц в буровой раствор на водной основе способна

на 20-30 % снизить коэффициент трения. Это делает такие растворы конкурентно способными по сравнению с растворами на углеводородной основе, применение которых ограничивается природоохранными требованиями.

В нашей работе проведено исследование влияния добавок наночастиц на реологические свойства буровых растворов. Вязкость и реология буровых растворов играют важнейшее значение для их применения, поскольку от них зависят потери давления при промывке скважины, эффективность выноса шлама, устойчивость ствола скважины и многие другие факторы при бурении. Систематических экспериментальных данных относительно влияния наночастиц на реологию суспензий в настоящий момент нет. В качестве базовой модели бурового раствора применялась водная суспензия глинистых растворов. Массовая концентрация глины 5%. Химический состав глины приведен в таблице 1. Среднеарифметический размер частиц глины в водном растворе был равен 1,5 мкм. Для определения размера наночастиц использовался анализатор Malvern Zetasizer Nano ZS. Глинистый раствор приготавливался путем добавление частиц в дистиллированную воду и интенсивном перемешивании в течение 30 минут с помощью высокоростной мешалки (OFITE 152-18 - одношпindelная хромированная мешалка Prince Castle) на 20000об/мин. После приготовления глинистая суспензия для стабилизации свойств выдерживалась в течении двух суток для окончательного набухания глины. Коллоидная устойчивость суспензий контролировалась с помощью анализатора (TURBISCAN LAB).

Далее в приготовленную таким способом глинистую суспензию вводилось необходимое количество заранее приготовленных наносуспензии. Аналогичное количество дистиллированной воды приливалось в образец базовой глинистой суспензии, таким образом, чтобы обеспечить одинаковую массовую концентрацию частиц глины во всех исследуемых растворах. Для приготовления наносуспензии использовался стандартный двухшаговый метод. Необходимое количество порошка добавляется в жидкость, после чего полученная суспензия тщательно механически перемешивается. Чтобы разрушить

конгломераты наночастиц, суспензии подвергаются обработке в ультразвуковой ванне «Сапфир ТЦ-10338».

В качестве наночастиц в работе рассмотрены частицы оксидов кремния, алюминия и титана. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.25 до 2% по массе. Размер частиц варьировался от 5 до 100 nm.

Исследование реологии созданных наносуспензий проведено при помощи ротационного вискозиметра OFITE НРНТ. Диапазон скоростей вращения: 0,01 – 600 rpm. Точность поддержания скорости: 0,001 rpm. Диапазон скорости сдвига: 0,01 – 1022 s⁻¹. Погрешность измерения вязкости 2%. Все измерения проведены при атмосферном давлении и температуре 298 К.

В результате серий измерений получены зависимости коэффициента вязкости рассматриваемых суспензий от скорости сдвига. Анализ результатов показал, что все исходные наносуспензии являются ньютоновскими жидкостями. Их вязкость не зависит от скорости сдвига. Полученные результаты [7] говорят о том что, во-первых, коэффициенты вязкости данных наносуспензий зависят от размера наночастиц, а во-вторых, вязкость наножидкости тем больше, чем меньше размер частиц. Кроме того, ни теория Эйнштейна [8],

$$(\mu = \mu_0[1 + (5/2)\varphi]),$$

ни теория Бетчелора [9]

$$\mu / \mu_0 = 1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2$$

равно, как и другие классические теории, не описывают экспериментальных данных для наночастиц меньших 100 nm.

Базовый глинистый раствор являлся неньютоновским. Его реология хорошо описывалась с помощью степенной модели

$$\mu = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1},$$

где $K = 1,24 \text{ mPa} \cdot \text{s}^n$ - среднее значение 0,47 - показатель консистенции наножидкости, $\dot{\gamma}$ - скорость сдвига, c^{-1} , $n = 0,47$ - индекс течения наножидкости.

Полученные экспериментальные данные по вязкости глинистых суспензий с наночастицами помимо степенной модели были аппроксимированы моделью Бингама:

$$\mu_f = \left(\tau_0 + k_v \cdot \dot{\gamma} \right) \cdot \dot{\gamma}^{-1},$$

здесь τ_0 - предел текучести вязкопластической жидкости, k_v - пластическая вязкость.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при низких концентрациях наночастиц реология суспензий лучше описывается степенной моделью (коэффициент достоверности 0,99, в то время как для модели Бингама 0,93). При повышении концентрации наночастиц реология наносуспензий лучше описывается моделью Бингама (коэффициент достоверности 0,98 против 0,95 для степенной модели). Таким образом, установлено, что с увеличением концентрации наночастиц в суспензии может меняться реологическая модель. На рисунках 1-2 показаны реологические параметры глинистых суспензий с добавлением наночастиц оксида кремния различного размера. Из анализа полученных данных видно, что добавление наночастиц существенно влияет на реологию суспензии даже при очень низких концентрациях. С увеличением концентрации наночастиц значительно снижается показатель степенной модели, а индекс консистенции, предельное напряжение и пластическая вязкость, напротив, возрастают. При этом видно, что реологические свойства исследуемых суспензий также значительно зависят не только от концентрации, но и от размера добавляемых наночастиц. С уменьшением размера наночастиц это влияние усиливается. Таким образом, впервые было показано, что с уменьшением размера наночастиц показатель степенной модели суспензий снижается, а индекс консистенции, предельное напряжение и пластическая вязкость увеличиваются. При

этом добавление наночастиц средним размером более 50 nm практически не влияет на реологические параметры суспензий.

Помимо концентрации и размера наночастиц было исследовано влияние материала наночастиц на реологические характеристики глинистых суспензий. Для этого были отобраны наносуспензии с максимально близкими по возможности средними размерами наночастиц. Это наночастицы оксида кремния с размером 50 nm, алюминия – 43 nm и оксида титана – 47 nm. Полученные данные, показанные на рисунке 3, позволяют сделать выводы относительно влияния материала наночастиц на реологию суспензий. Не смотря на то, что наночастицы оксидов кремния, титана и алюминия имеют близкий средний размер частиц, при одинаковой концентрации наночастиц их реология существенно отличается. Наиболее значительное влияние на реологию при прочих равных условиях оказывают наночастицы оксида алюминия. Зависимость вязкости от размера и материала не свойственна классическим суспензиям, и является отличительной характеристикой наносуспензий. Примеры подобного поведения для наносуспензий можно найти в работах [7, 10].

Таким образом, в данной работе было показано, что добавки наночастиц могут значительно менять реологические свойства буровых растворов. При этом в отличие от суспензий с макро и микроскопическими размерами частиц реологические параметры наносуспензий зависят от размеров и материала наночастиц и изменяются значительно уже при небольших их концентрациях. Это открывает широкую перспективу применения наночастиц для управления характеристиками буровых растворов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-79-20218

Список литературы

1. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И. Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 24, с. 9-16.
2. Пряжников М.И., Минаков А.В., Рудяк В.Я. Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 18, с. 53-59.
3. Минаков А.В., Лобасов А.С., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И. Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 13, с. 44-51.
4. Евдокимов И.Н. «Наножидкости» и «умные жидкости» в технологиях разработки нефтегазовых месторождений: Учебное пособие для вузов. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2016. – 247 с.
5. Люгай Д.В., Шарафутдинов З.З. Управление поведением дисперсных систем в строительстве скважин с применением нанотехнологий // Вести газовой науки, 2010. - №1(4). - С. 270-281.
6. Хузина Л.Б., Петрова Л.В., Любимова С.В. Методы снижения трения при разработке месторождений горизонтальными скважинами // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». - 2012. - №5. - С. 62-70.
7. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Сметанина М. С., Пряжников М. И. Доклады Академии наук, 2016, том 467, № 3, с. 1–3.
8. Einstein A. // Annalen der Physik. 1906. Bd. 19. P. 289–306.
9. Batchelor G.K. // J. Fluid Mech. 1977. Vol. 83, pt. 1. P. 97–117.
10. Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A. // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 874–885

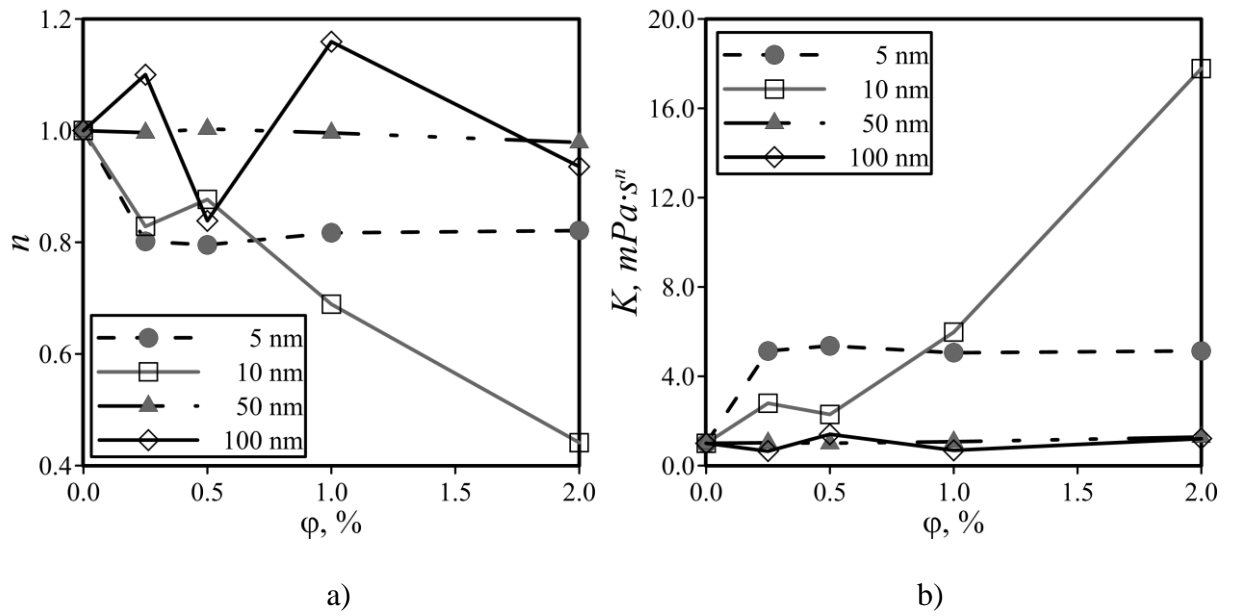


Рис.1. Зависимость индекса течения n (а) и показателя консистенции K (б) суспензии от концентрации и размера наночастиц оксида кремния.

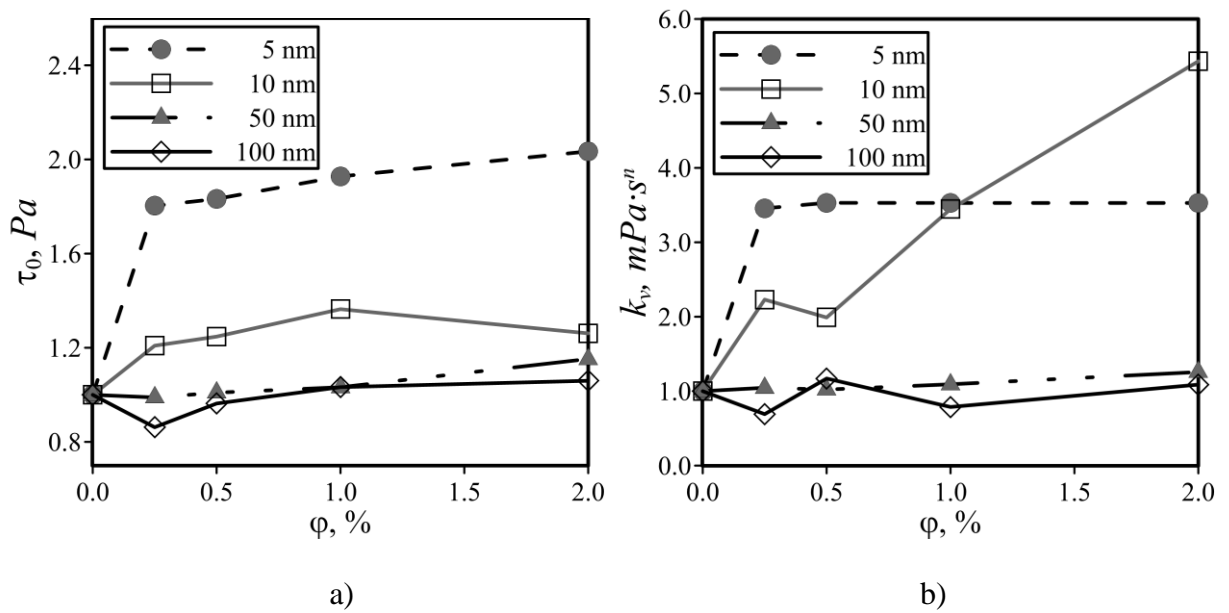


Рис.2. Зависимость предельного напряжения сдвига (а) и пластической вязкости (б) суспензии от концентрации и размера наночастиц оксида кремния.

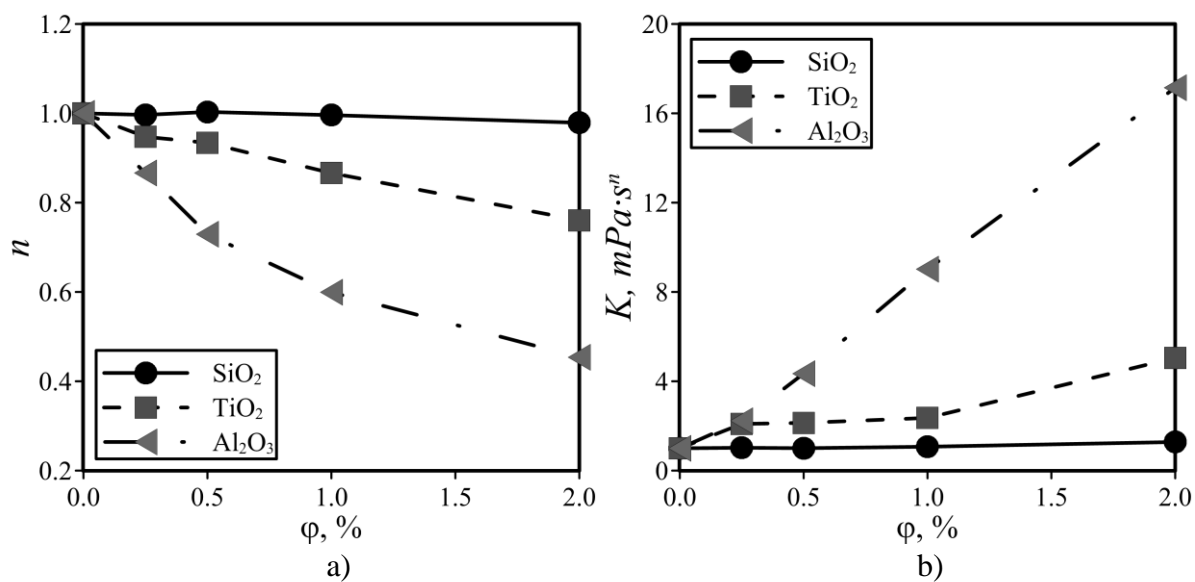


Рис.3. Зависимость индекса течения n (а) и показателя консистенции K (б) суспензии от концентрации и материала наночастиц

Таблица. 1 . Химический состав глины в %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	nnn
59.68	18.63	3.93	2.76	2.43	14.62	0.98	0.67	0.589	0.16	0.12	0.05	8.38