

03

Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на реологические свойства суспензии

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

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: tov-andrey@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2017 г.

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 mass%. Размер частиц варьировался от 5 до 100 nm. Установлены зависимости эффективной вязкости и реологических параметров этих растворов от концентрации, размера и материала наночастиц.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.09.46059.17166

Активный интерес к суспензиям с наночастицами (наножидкостям) возник 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, составной частью которых являются наночастицы. Это обусловило широчайший

Химический состав глины (в mass %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Остальное
59.68	18.63	3.93	14.62	3.14

спектр применения наножидкостей [1–3]. В технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений наножидкости стали использоваться существенно позже. 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 буровой 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 конкурентоспособными в отличие от растворов на углеводородной основе, применение которых ограничивается природоохранными требованиями.

В настоящей работе проведено исследование влияния добавок наночастиц на реологические свойства буровых растворов. Вязкость и реология буровых растворов имеют 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 о влиянии 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. Среднеарифметический размер частиц глины в водном растворе был равен 1.5 μm . Для определения размера наночастиц использовался анализатор Malvern Zetasizer Nano ZS. Глинистый раствор готовился путем добавления частиц в дистиллированную воду и интенсивного перемешивания в течение 30 min с помощью высокоскоростной мешалки (OFITE 152-18 — одношпиндельная хромированная мешалка Prince Castle) на 20 000 rpm. После приготовления глинистая суспензия для стабилизации свойств выдерживалась в течение двух суток для

окончательного набухания глины. Коллоидная устойчивость суспензий контролировалась с помощью анализатора (TURBISCAN LAB).

Далее в полученную таким способом глинистую суспензию вводилось необходимое количество заранее приготовленных наносуспензий. Аналогичное количество дистиллированной воды вливалось 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 добавлялось в жидкость, после чего полученная суспензия тщательно механически перемешивалась. Чтобы разрушить конгломераты наночастиц, суспензии подвергались 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 mass %, размер частиц — от 5 до 100 nm.

Реологические свойства созданных наносуспензий исследовались 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] свидетельствуют 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 Бэтчелора [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.

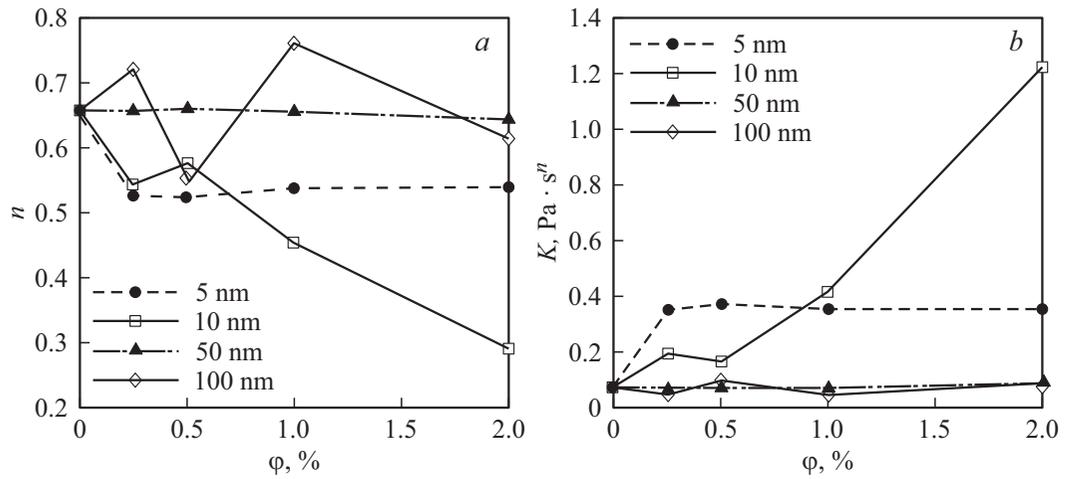


Рис. 1. Зависимость индекса течения n (a) и показателя консистенции K (b) суспензии от концентрации и размера наночастиц оксида кремния.

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

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

где $K = 0.069 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ — среднее значение показателя консистенции наножидкости, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига [s^{-1}], $n = 0.658$ — индекс течения наножидкости.

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

$$\mu_f = (\tau_0 + k_v \dot{\gamma}) \dot{\gamma}^{-1}.$$

Здесь τ_0 — предел текучести вязкопластической жидкости, k_v — пластическая вязкость.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что при низких концентрациях наночастиц реология суспензий лучше описывается степенной моделью (коэффициент достоверности 0.99, в то время как для модели Бингама он составляет 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 рис. 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 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 со средним размером более 50 nm практически не влияет на реологические параметры суспензий.

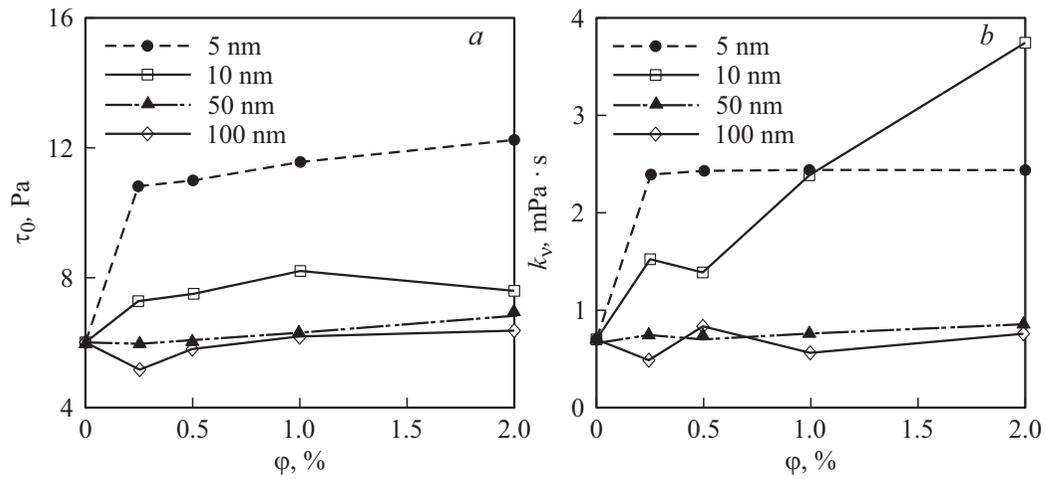


Рис. 2. Зависимость предельного напряжения сдвига (а) и пластической вязкости (b) суспензии от концентрации и размера наночастиц оксида кремния.

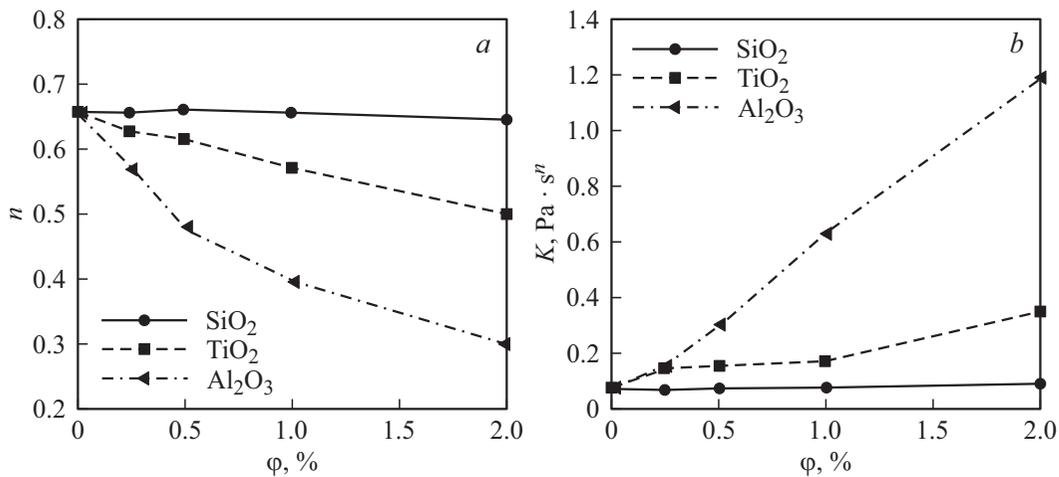


Рис. 3. Зависимость индекса течения n (а) и показателя консистенции K (б) суспензии от концентрации и материала наночастиц.

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

Таким образом, в работе показано, что добавки наночастиц могут значительно менять реологические свойства буровых растворов. При этом в отличие от суспензий с макро- и микроскопическими размерами частиц в наносуспензиях реологические параметры 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. Т. 42. В. 24. С. 9–16.
- [2] Пряжников М.И., Минаков А.В., Рудяк В.Я. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 18. С. 53–59.
- [3] Минаков А.В., Лобасов А.С., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 44–51.
- [4] Евдокимов И.Н. Наножидкости и „умные жидкости“ в технологиях разработки нефтегазовых месторождений: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом „Недра“, 2016. 247 с.
- [5] Люгай Д.В., Шарафутдинов З.З. // Вести газовой науки. 2010. № 1(4). С. 270–281.

- [6] Хузина Л.Б., Петрова Л.В., Любимова С.В. // Нефтегазовое дело. Электрон. науч. журн. 2012. № 5. С. 62–70.
- [7] Рудяк В.Я., Минаков А.В., Сметанина М.С., Пряжников М.И. // ДАН. 2016. Т. 467. № 3. С. 1–3.
- [8] *Einstein A.* // Ann. der Phys. 1906. Bd. 19. P. 289–306.
- [9] *Batchelor G.K.* // J. Fluid Mech. 1977. V. 83. Pt 1. P. 97–117.
- [10] *Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 874–885.