

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ И КАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЯЗКИХ РАСТВОРОВ

С. Р. Ганиев*, Ю. С. Кузнецов, О. В. Шмырков

Представлено академиком РАН Р.Ф. Ганиевым 06.08.2018 г.

Поступило 06.08.2018 г.

Приведены экспериментальные результаты по исследованию влияния нелинейных волновых и кавитационных процессов, протекающих в проточных рабочих частях гидродинамических генераторов вихревого и плоского типов с телами обтекания различных форм, на физико-механические свойства глинистой суспензии. Исследованию подвергались модели генератора вихревого типа с тангенциальными и радиальными каналами для подачи рабочей жидкости генератора, представляющего собой плоский канал с тремя телами обтекания цилиндрической формы.

Ключевые слова: буровой раствор, суспензия, кавитация, многофазная система, волновые аппараты, генератор, реологические свойства, гидродинамический стенд, пульсация давления.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484410-414>

В результате проведённых исследований получено, что волновая обработка глинистой суспензии приводит к повышению качества коллоидной фракции суспензии и тем самым к снижению расхода глинопорошка, в несколько раз снижает время приготовления бурового раствора по сравнению с традиционной технологией. Самая высокая эффективность волновой обработки достигается гидродинамическими генераторами, в проточной части которых нелинейные волновые и кавитационные процессы проходили наиболее интенсивно. Промышленные эксперименты подтвердили результаты лабораторных исследований и позволяют существенно (в несколько десятков процентов) повысить продуктивность бурения. Выполненные лабораторные и промышленные эксперименты открывают принципиально новые направления управления реологическими свойствами растворов, в частности буровых растворов.

Научная постановка проблем нелинейной волновой механики многофазных систем, в том числе кавитационных явлений в волновых полях, возникла вследствие запросов практики, в частности потребностей нефтяной промышленности. Технология приготовления буровых растворов и технологических жидкостей в процессе

строительства глубоких скважин существенно влияет на технико-экономические показатели бурения и сохранение естественной проницаемости продуктивных пластов. От качества и соответствия растворов геологическим условиям зависит скорость бурения, предотвращение аварий и осложнений, связанных с прихватами и устойчивостью стволов скважин, износоустойчивость бурового оборудования и инструмента и успешное цементирование. Качество буровых растворов и технологических жидкостей напрямую зависит от дисперсности твёрдой фазы. Для диспергирования специальных материалов, таких как глина, утяжелитель, мел и др., применяются различного рода устройства, как правило, механические и гидравлические перемешиватели [1, 2]. Не всегда их работа достаточно эффективна. В волновой технологии для обработки многофазных сред, в частности для повышения уровня дисперсности и гомогенности растворов, используют гидродинамические проточные генераторы вихревого типа и генераторы, в плоских профилированных камерах которых установлены тела обтекания различной геометрии [3, 4]. Теоретические основы волновой технологии изложены в работах [5–7]. В этих волновых аппаратах, в частности генераторах, используются вихревые высокотурбулентные отрывные потоки жидкости и обширные области развитой кавитации для возбуждения мощных нелинейных колебаний и волн в обрабатываемых средах,

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской Академии наук, Москва*

* E-mail: lle@bk.ru

отдельные аспекты кавитационных процессов, выполненные также в работах [8–10].

Целью данной работы является исследование влияния волновой обработки суспензии монтмориллонитовой глины в генераторах колебаний волн проточного типа на дисперсность и реологические свойства суспензии как в лабораториях, так и в промышленных условиях, и определить возможности эффективного управления их реологическими свойствами. В данной работе приведены экспериментальные результаты по исследованию влияния нелинейных волновых и кавитационных процессов, протекающих в проточных рабочих частях гидродинамических генераторов вихревого и плоского типов с телами обтекания различных форм, на физико-механические свойства глинистой суспензии. Исследованию подвергались модели генератора вихревого типа с тангенциальными и радиальными каналами для подачи рабочей жидкости генератора, представляющего собой плоский канал с тремя телами обтекания цилиндрической формы (рис. 1).

В качестве рабочей среды использовалась суспензия глинопорошка в воде, концентрация которого варьировалась в пределах $C_0 = 1\text{--}6\%$. По результатам ранних исследований были выбраны варианты генераторов вихревого типа с геометрией проточной части и мест расположения каналов для подачи в качестве рабочей жидкости воды, при которых ширина спектра и амплитуда колебаний давления, а также интенсивность кавитации были максимальны [8, 9]. Генераторы вихревого типа с двумя тангенциальными каналами имели следующие размеры: 1) диаметр камеры $d_k = 10$ мм, диаметр сопла $d_c = 10$ мм, расстояние от дна до края отверстий подачи рабочего тела $l_y = 5$ мм, диаметр отверстий подачи рабочего тела $d_y = 2$ мм; 2) $d_k = 10$ мм, $d_c = 5$ мм, $l_y = 20$ мм, $d_y = 2$ мм. Генератор вихревого типа

с двумя радиальными каналами: $d_k = d_c = 10$ мм, $l_y = 0$, $d_y = 2$ мм. Размеры проточной части генератора плоского типа перед цилиндрическими телами обтекания составляли: ширина 12 мм, высота 6 мм; диаметры тел обтекания $d_T = 6$ мм и 8 мм. Генераторы вихревого типа с тангенциальными каналами устанавливались под углом $\gamma = 0$ и 45° к оси рабочей камеры на выходе генераторов. Остальные генераторы устанавливались под углом $\gamma = 0$. Испытания проводили на гидродинамическом стенде ИМАШ РАН. Для генераторов вихревого типа давление на входе генераторов составляло $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа; на выходе $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа. Для генераторов плоского типа с телами обтекания $P_{\text{вх}} = 0,7$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,3$ МПа. Расход глинистой суспензии $Q = 20$ л/мин. Температура $T = 20^\circ\text{C}$.

Результаты сравнительных испытаний исследуемых генераторов показали, что при волновой обработке глинистого раствора проточными гидродинамическими генераторами вихревого типа с тангенциальными и радиальными каналами (при $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа), а также генераторов плоского типа с цилиндрическими телами обтекания (при $P_{\text{вх}} = 0,7$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,3$ МПа) при концентрации глинистого порошка $C_0 = 3\%$ и времени обработки $t = 25$ мин динамическое напряжение сдвига увеличилось на 60–90%; пластическая вязкость в среднем возросла на 25–30%. Сравнение гранулометрических характеристик проб глинистой суспензии до и после волновой обработки показало, что после волновой обработки количество твёрдых частиц размером 1–2 мкм увеличилось в среднем в 2,5 раза и достигло около 30%, а количество частиц размером 3–4 мкм возросло до 13%.

Гранулометрическое исследование глинистой суспензии до и после волновой обработки волновым генератором с тангенциальными каналами ($d_k = 10$ мм, $d_c = 5$ мм, $l_y = 20$ мм), угол наклона

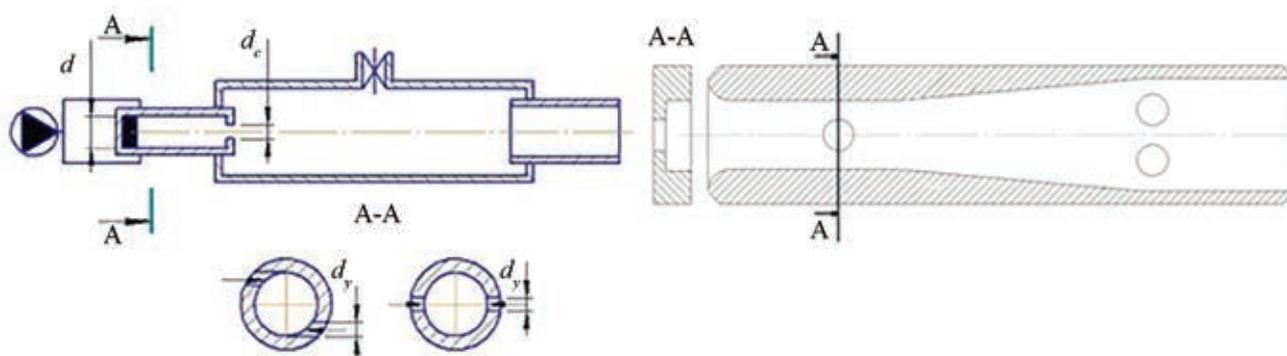


Рис. 1. Принципиальные схемы проточных гидродинамических генераторов с тангенциальными и радиальными каналами и генератор плоского типа с тремя телами обтекания.

выходящей струи которого составляет $\gamma = 45^\circ$, показали, что после волновой обработки вся диаграмма распределения существенно сместилась в сторону меньших размеров частиц, при этом количество самых мелких частиц размером до 5 мкм резко увеличилось. Наиболее высокая эффективность волновой обработки глинистой суспензии была получена при использовании вихревых генераторов с тангенциальными каналами ($d_k = 10$ мм, $d_c = 5$ мм, $l_y = 20$ мм) и с радиальными каналами ($d_k = d_c = 10$ мм, $l_y = 0$) с углом наклона выходящих струй $\gamma = 0$. В этих генераторах интенсивность кавитации, являющейся одним из основных факторов разрушения частиц в многофазной среде, была наиболее высокой. Такая же эффективность волновой обработки была достигнута на генераторе с тангенциальными каналами ($d_k = d_c = 10$ мм, $l_y = 5$ мм) при наклоне выходных струй на угол $\gamma = 45^\circ$, несмотря на то, что в этом генераторе интенсивность кавитации была не столь значительна. Для выявления механизма повышения пластической вязкости и динамического напряжения сдвига после волновой обработки глинистой суспензии были проведены исследования пульсаций давления в рабочей камере за генераторами и гранулометрических характеристик проб глинистой суспензии до и после волновой обработки. Как показали амплитудно-частотные характеристики на всех исследуемых генераторах при $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа и угле наклона выходящих струй из генератора $\gamma = 0$ в диапазоне частот $f = 0,5$ –15 кГц, в рабочей камере возбуждаются волны нелинейного типа примерно равной амплитуды для всех генераторов вихревого типа. Увеличение угла наклона выходящих струй на $\gamma = 45^\circ$ приводит к появлению мощного пика давления на частоте $f \approx 500$ Гц, амплитуда которого примерно в 5 раз превышает амплитуду пульсаций давления на этой частоте при $\gamma = 0$ (рис. 2), что также является одним из факторов разрушения частиц в многофазной среде. Возбуждение в вихревых генераторах мощных нелинейных волн, образование высокотурбулентных завихренных потоков и тороидальных вихрей приводят к интенсивному перемешиванию частиц в многофазной среде. Таким образом, измельчение частиц глинистой суспензии и увеличение доли коллоидной фракции являются, по нашему мнению, основной причиной роста динамического напряжения сдвига глинистой суспензии после волновой обработки.

С увеличением времени волновой обработки глинистого раствора (концентрация 3%) в диапазоне $t = 0$ –20 мин вихревым генератором

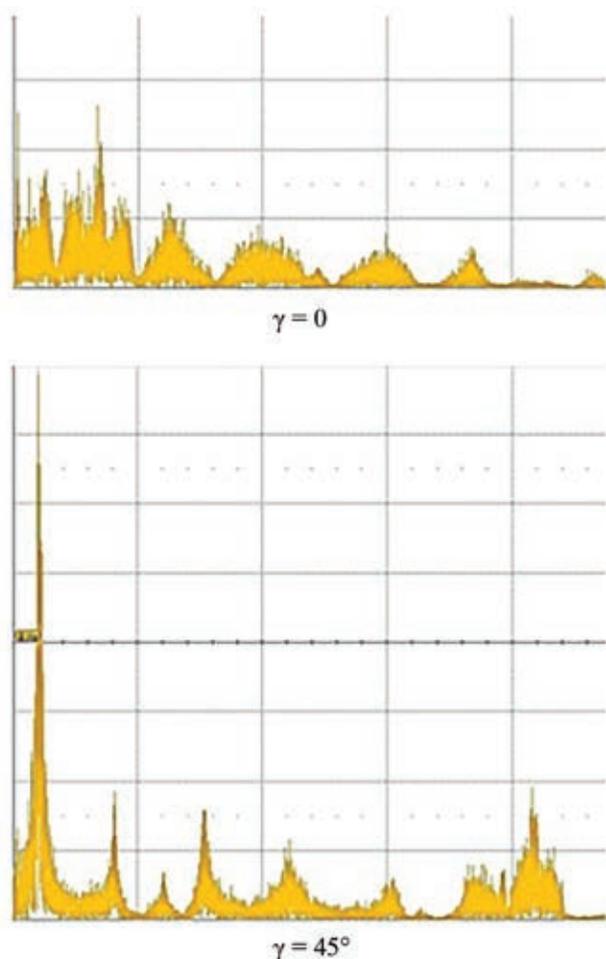


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в рабочей камере за генератором с тангенциальными каналами (№ 2) ($\gamma = 0$ и 45°) при $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа.

с тангенциальными каналами (№ 1) при $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа, $T = 24^\circ\text{C}$ динамическое напряжение сдвига заметно возрастает с $\tau_0 = 0,4$ Па до $\tau_0 = 2,0$ Па со стабилизацией параметра при $t > 6$ мин (рис. 3). Пластическая вязкость при этом изменяется в диапазоне $\eta = (2,3$ – $3,4)$ МПа \cdot с.

Анализ гранулометрических характеристик показал, что концентрация частиц размером 1–2 мкм, 2–3 мкм и 3–4 мкм с увеличением времени обработки $t = 0$ –20 мин возрастает в 2–3 раза и достигает 20–30%. При этом количество крупных частиц размером 10–20 мкм и более снижается почти в 3 раза уже при $t = 3$ мин (рис. 4). Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления по времени волновой обработки глинистой суспензии практически не менялись. Увеличение концентрации глинопорошка

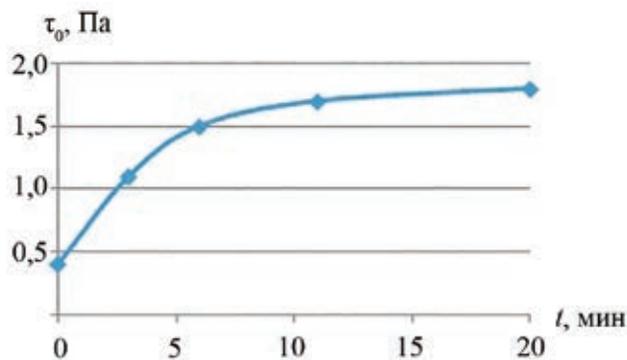


Рис. 3. Зависимость $\tau_0 = f(t)$ для волновой обработки 3%-ной глинистой суспензии вихревым генератором с тангенциальными каналами 1-го типа ($\gamma = 45^\circ$) при $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа, $T = 24^\circ\text{C}$.

в растворе в пределах $C_0 = (1-6)\%$ практически не повлияло на полученные результаты.

Наряду с лабораторными исследованиями на экспериментальной базе ИМАШ РАН испытания волновых генераторов проводили в промышленных условиях. Испытаниям подверглись гидродинамические волновые генераторы проточного типа с цилиндрическими телами обтекания и генераторы вихревого типа с тангенциальными и радиальными каналами. Результаты опытно-промышленных испытаний полностью подтвердили экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях ИМАШ РАН.

В результате проведённых исследований получено, что при волновой обработке в течение $t = 25$ мин проточными гидродинамическими генераторами вихревого типа с тангенциальными и радиальными каналами и генератором плоского типа с цилиндрическими телами обтекания глинистой суспензии с концентрацией глинопорошка в растворе $C_0 = (1-6)\%$ пластическая вязкость возросла на 30%, динамическое напряжение сдвига увеличилось на 60–90%, количество твёрдых частиц размером (1–4) мкм составило 40% от объёма обрабатываемой среды. Это означает, что волновая обработка глинистой суспензии приводит к повышению качества коллоидной фракции суспензии и тем самым к снижению расхода глинопорошка. В течение времени волновой обработки $t = 1-20$ мин динамическое напряжение сдвига плавно увеличивалось с $\tau_0 = 0,4$ Па до $\tau_0 = 1,8$ Па, количество частиц размером 1–2 мкм к концу испытания выросло на 30%, количество крупных частиц размером 10–20 мкм за время обработки в течение $t = 3-6$ мин снизилось почти в 3 раза. Таким образом, волновая обработка глинистой суспензии

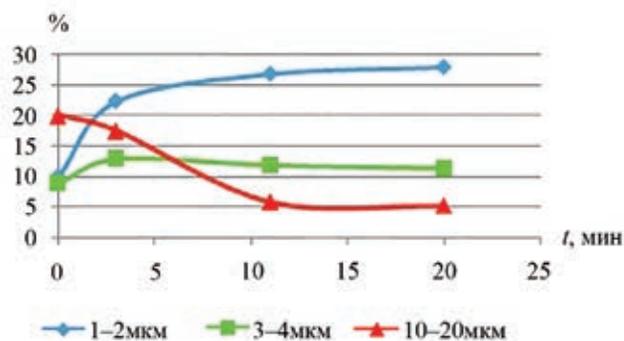


Рис. 4. Зависимость концентрации частиц размером 1–2; 3–4; 10–20 мкм от времени волновой обработки глинистой суспензии с $C_0 = 3\%$ вихревым генератором с тангенциальными каналами (№ 1) при $\gamma = 45^\circ$, $P_{\text{вх}} = 5,1$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,6$ МПа.

в несколько раз снижает время приготовления бурового раствора по сравнению с традиционной технологией. Увеличение концентрации глинопорошка в растворе в пределах $C_0 = (1-6)\%$ практически не влияет на эффективность волновой обработки глинистой суспензии. Показано, что самая высокая эффективность волновой обработки достигается гидродинамическими генераторами, в проточной части которых нелинейные волновые и кавитационные процессы проходили наиболее интенсивно. Промышленные эксперименты подтвердили результаты лабораторных исследований и позволяют существенно (в несколько десятков процентов) повысить эффективность бурения. Таким образом, выполненные лабораторные и промышленные эксперименты открывают принципиально новые направления управления реологическими свойствами растворов, в частности буровых растворов и существенно повысить эффективность бурения в промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Резниченко И.Н.* Приготовление, обработка и очистка буровых растворов. М.: Недра, 1982. 230 с.
2. *Гайдаров М.М.-Р., Нифантов В.И., Джафаров К.И.* Дезинтеграторная технология приготовления буровых растворов и технологических жидкостей. ПХГ: надежность и эффективность: материалы Международной конференции (Москва, 11–13 октября 2006 г.). М.: ИРЦ Газпром, 2007. Т. 2. С. 61–73.
3. *Авдеевский В.С., Ганиев Р.Ф., Калашиников Г.А., Костров С.А., Муфазалов Р.Ш.* Гидродинамический генератор колебаний. Пат. № 2015749 РФ // Бюл. Изобр. 1994. № 13. С. 34.

4. Шмырков О.В., Юшков Н.Б., Кормилицин В.И. Исследование характеристик плоского волнового генератора проточного типа с различными телами обтекания // Инж. журн. 2013. № 2. С. 12–19.
5. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Науч. центр РХД, 2008. 192 с.
6. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. М.: Науч.-изд. центр РХД, 2008. 712 с.
7. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Науч.-изд. центр РХД, 2013. 592 с.
8. Ганиев Р.Ф., Шмырков О.В., Жебенев Д.А., Ганиев С.Р., Ганиев О.Р., Фельдман А.М. Исследование влияния геометрических размеров гидродинамического вихревого генератора колебаний давления на спектральные характеристики // Инж. журн. с прил. 2010. № 5. С. 15–19.
9. Шмырков О.В. Исследование кавитации в вихревом генераторе проточного типа // МЖГ. 2015. № 3. С. 22–31.
10. Ганиев Р. Ф., Жебенев Д. А., Шмырков О. В. Исследование влияния интенсивности колебаний давления на качество диспергирования газа в жидкости // МЖГ. 2009. № 5. С. 94–100.

NONLINEAR WAVE AND CAVITATION PROCESSES AND THEIR EFFECT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF VISCOUS SOLUTIONS

S. R. Ganiev, I. S. Kuznetsov, O. V. Shmyrkov

Presented by Academician of the RAS R.F. Ganiyev August 6, 2018

Received August 6, 2018

In this paper, we present experimental results on the effect of nonlinear wave and cavitation processes occurring in flowing working parts of hydrodynamic generators of vortex and flat types with flow bodies of various shapes on the physicomaterial properties of a clay suspension. The model of the vortex-type generator with tangential and radial channels for feeding the working fluid of the generator, which is a flat channel with three bodies of flow around a cylindrical shape, was subjected to research.

Keywords: Drilling mud, suspension, cavitation, multiphase system, wave devices, generator, rheological properties, hydrodynamic stand, pressure pulsation.