

Гидродинамический кавитационный смеситель для получения нефтекислотных эмульсий и практика его использования на нефтяных месторождениях Республики Беларусь

Д.В. Ткачев (заведующий лабораторией интенсификации добычи нефти), Г.Г. Печерский (заведующий лабораторией химического обеспечения интенсификации добычи нефти, канд. техн. наук)

(РУП "Производственное объединение "Белоруснефть" БелНИПИнефть),

В.М. Ткачев (заместитель декана), А.М. Селютин (канд. техн. наук, доцент), А.И. Столяров (старший преподаватель)

(Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого")

В статье описан опыт проектирования гидродинамических смесителей для получения водонефтяных и нефтекислотных эмульсий. На основе численного моделирования многофазного течения рабочей жидкости в условиях развитой кавитации разработана конструкция смесителя с применением центробежных форсунок. Приведены результаты промысловых испытаний смесителя при обработке добывающих скважин нефтекислотными эмульсиями на месторождениях Республики Беларусь. Проведены комплексные исследования эмульсий, полученных при различных технологических режимах в промысловых и лабораторных условиях. Представлены показатели эффективности от проведенных геолого-технических мероприятий по интенсификации притока методом направленных кислотных обработок.

Карбонатные нефтяные коллекторы Республики Беларусь характеризуются наличием участков продуктивных горизонтов, неоднородных по своим фильтрационным свойствам, в которых имеются как высокопроницаемые, так и низкопроницаемые прослои. В таких условиях обычные кислотные обработки, как правило, являются низкоэффективными. Для повышения эффективности работ по интенсификации притока нефти к добывающим скважинам в данных условиях применяют направленные кислотные обработки (НКО), в том числе и с использованием нефтекислотных эмульсий (НКЭ) [1].

Суть нефтекислотной обработки состоит в поочередной порционной закачке в пласт НКЭ и водных растворов кислот. Нефтекислотные эмульсии представляют собой высокодисперсные системы, дисперсионной средой которых является нефть, а дисперсионной фазой – водный раствор кислоты. Обладая довольно высокой вязкостью и, как следствие, низкой фильтруемостью в пласт, НКЭ проникают преимущественно в наиболее трещиноватые высокопроницаемые интервалы и временно блокируют их. Это приводит к перераспределению закачиваемых кислотных составов и способствует их направленному воздействию на низкопроницаемые участки коллектора. В дополнение к этому, НКЭ после выполнения блокирующей функции постепенно разрушаются в пласте и высвобождают кислотный компонент, который вступает в химическую реакцию с породой в призабойной зоне пласта. В результате реализации НКО по приведенной схеме увеличивается охват пласта кислотным воздействием как по толщине, так и по глубине коллектора [1–3].

Приведенные выше преимущества НКО с использованием НКЭ обуславливают необходимость разработки технических средств для получения стойких высокодисперсных НКЭ в промысловых условиях. Основной особенностью проектирования подобных устройств для нефтедобывающей отрасли является то, что используемые при их эксплуатации реагенты и рабочие жидкости являются высокоагрессивными по отношению к металлам и их сплавам. Воздействие используемых агрессивных реагентов на составные части или механизмы, особенно подвижные, приводит к быстрому выходу их из строя, что снижает надежность и долговечность таких устройств в целом.

Учитывая вышесказанное, в течение нескольких лет в БелНИПИнефти ведется разработка устройств, предназначенных для получения НКЭ в промысловых условиях на устье скважины. Работа их основана на использовании эффекта кавитации, что исключает наличие подвижных деталей, которые наиболее подвержены износу [4]. На этом принципе разработаны устройства для гидроимпульсной обработки скважин, в том числе с использованием колтюбинговой техники, а также для получения водонефтяных и нефтекислотных эмульсий.

При гидравлическом диспергировании применяют струйные форсунки с соударением струй и центробежные. Форсунки с соударением струй работают по принципу разбивания на капли нескольких струй, вытекающих из соответствующих насадок. Из точки столкновения двух цилиндрических струй результирующий поток растекается радиально, образуя плоскую пленку, распадающуюся на капли. Центробежные форсунки обычно имеют тангенциальные входные от-

верстия, что способствует более интенсивному распаду струи при ее выходе из сопла.

Ранее в БелНИПИнефти была предпринята попытка разработки конструкции смесителя с соударением струй. Однако, как показала практика, при неустойчивой работе насосных агрегатов и значительном различии плотностей компонентов эмульсии образующаяся радиальная пленка будет нестабильной и получить требуемое соотношение фаз эмульсии невозможно, что в конечном счете отражалось на качестве её приготовления и, соответственно, в целом на геологических мероприятиях (табл. 1). В разработанной к настоящему времени конструкции был применен второй вариант форсунок – центробежные.

С целью выработки оптимальной конструкции смесителя, проверки адекватности математической модели гидродинамического течения многокомпонентной смеси и определения оптимальных режимов работы насосных агрегатов было проведено численное моделирование поведения рабочей жидкости с учетом кавитационного массопереноса.



Рис. 1. Опытный образец разработанного кавитационного смесителя

Таблица 1

Соотношение компонентов смеси при различных технологических режимах для нефтекислотной эмульсии

Расход, кг/с	Кислота		Нефть	
	Давление на входе, МПа	Объемное содержание, %	Давление на входе, МПа	Объемное содержание, %
2	10,2	0,44	10,1	0,56
2,5	16,3	0,44	16,5	0,56
3	23,9	0,44	24,2	0,56
4	44,4	0,44	44,9	0,56
5	69,5	0,44	70,3	0,56

Из результатов модельных исследований следует, что рекомендуемый массовый расход на насосном агрегате должен быть в диапазоне 3,0...3,5 кг/с.

По результатам модельных исследований был спроектирован и изготовлен кавитационный смеситель (рис. 1).

В течение 2015 г. выполнен ряд опытно-промышленных испытаний с целью определения работоспособности и технологических параметров функционирования кавитационного смесителя при приготовлении нефтекислотного эмульсионного состава, зависимости наиболее значимых эксплуатационных характеристик приготовленных эмульсий от режима его работы, эффективности проведения интенсифицирующих направленных кислотных обработок карбонатных пластов месторождений РУП "Производственное объединение "Белоруснефть". Так, с целью восстановления фильтрационно-емкостных характеристик околоствольной зоны пласта на скв. 151 Южно-Сосновского месторождения была поставлена задача вы-

полнить работы по интенсификации притока текущего интервала перфорации. В качестве технологии воздействия на пласт выбрана направленная кислотная обработка. Приготовление нефтекислотной эмульсии в объеме 15 м³ выполнялось по технологической схеме, согласно рис. 2, с использованием разработанного кавитационного смесителя.

Во время приготовления и закачки НКЭ, с целью оптимизации рабочих характеристик смесителя, проводился отбор следующих проб НКЭ: проба № 1 – эмульсия, приготовленная со скоростью подачи реагентов 2 л/с; проба № 2 – эмульсия, приготовленная со скоростью подачи реагентов 3 л/с.

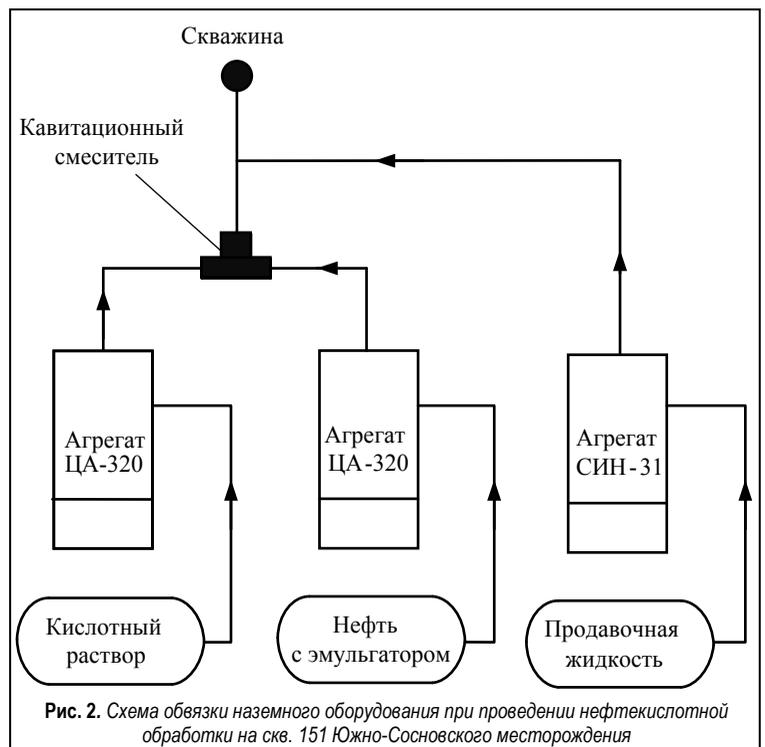


Рис. 2. Схема обвязки наземного оборудования при проведении нефтекислотной обработки на скв. 151 Южно-Сосновского месторождения

Технико-эксплуатационные характеристики промысловых и лабораторной проб НКЭ

Проба	Условия отбора	Внешний вид, структурные особенности	Стабильность
№ 1	Скорость подачи реагентов на смеситель 2 л/с	Равномерная с размерами частиц дисперсной фазы до 30 мкм	При температуре 20 °С в течение 24 ч НКЭ стабильна. При 35 °С в контакте с породой полностью разделилась через 50 ч
№ 2	Скорость подачи реагентов на смеситель 3 л/с	Равномерная с размерами частиц дисперсной фазы до 10 мкм	
№ 3	Лабораторная проба	Неравномерная с размерами частиц дисперсной фазы до 40 мкм	При температуре 20 °С в течение 24 ч НКЭ стабильна. При 35 °С в контакте с породой полностью разделилась через 24 ч

Таблица 3

Изменение характеристики проб НКЭ во времени

Время измерения	Проба	Условная вязкость, с (Ø сопла = 4 мм)	Плотность, г/см ³	Электростабильность, В
Сразу после приготовления	№ 1	39	0,913	144
	№ 2	29	0,923	164
	№ 3	25	0,966	62
Через 24 ч	№ 1	20	0,925	106
	№ 2	20	0,927	115
	№ 3	20	0,966	57

За эталон сравнения брали пробу НКЭ, приготовленную в лабораторных условиях по рецептуре, используемой на скв. 151 Южно-Сосновского месторождения. Для приготовления использовали товарную нефть, отобранную из емкости на скважине, кислоту соляную товарную концентрацией 22 % и эмульгатор. Лабораторную пробу готовили в следующей последовательности: заданное количество эмульгатора добавляли в нефть в течение 1 мин при постоянном перемешивании на лабораторной лопастной мешалке с частотой вращения 700 мин⁻¹. После этого в течение 1 мин в нефтяную фазу добавляли 15%-й водный раствор соляной кислоты при той же скорости вращения мешалки. Затем смесь реагентов эмульгировали в течение 10 мин при скорости вращения мешалки 1200 мин⁻¹. Следует отметить, что данная методика приготовления НКЭ является общепринятой и используется для оценки эмульгирующих свойств исследуемых реагентов, имитируя работу смесителя, работающего на основе струйных форсунок.

Исследование промысловых и лабораторной проб проводили по комплексу технико-эксплуатационных характеристик с применением следующих методов:

- внешний вид – визуально при естественном освещении;
- структурные особенности (тип эмульсии, средний размер частиц дисперсной фазы) – на микроскопе OLYMPUS BX 51;
- плотность при температуре 20 °С – пикнометрически;
- электростабильность – с помощью прибора для измерения электрической стабильности эмульсий ТЭЭ-01Ц;
- условная вязкость при комнатной температуре – с помощью вискозиметра ВЗ-246 (диаметр сопла 4 мм);
- стабильность – время выдержки, объем и количество выделившихся фаз при температуре 20 °С и при термостатировании (температура 35 °С) образцов нефтекислотной эмульсии объемом 100 мл с добавленной в них измельченной породы (известняка).

Результаты проведенных исследований проб НКЭ представлены в табл. 2 и 3 и на рис. 3.

Из данных табл. 2 и 3 следует, что образцы НКЭ, приготовленные с помощью кавитационного смесителя, характеризуются равномерностью распределения и меньшим размером дисперсной фазы, высокими значениями электростабильности, что указывает на более высокую стабильность НКЭ во времени и при контакте с породой (табл. 2).

На оптико-микроскопических изображениях (см. рис. 3) показано, что проба № 3, приготовленная в лабораторных условиях по рецептуре, используемой на скв. 151 Южно-Сосновского месторождения, характеризуется неравномерной структурой с большим количеством крупных капель (до 40 мкм), в то время как промысловые пробы НКЭ – равномерным соотношением и распределением фаз; размеры частиц дисперсной фазы до 10 мкм у пробы № 2 и до 30 мкм у пробы

№ 1. Полученные результаты указывают на то, что такое отличие лабораторной пробы НКЭ от промысловых обусловлено более интенсивным и эффективным смешением компонентов НКЭ кавитационным смесителем.

Высокая степень дисперсности НКЭ, приготовленных при помощи кавитационного смесителя, достигается за счет пульсаций давления вследствие кавитации. При проведении работ на скв. 151 Южно-Сосновского месторождения измеряли давление на выходе смесителя. По результатам измерений давления с помощью преобразований Фурье строили амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) (рис. 4).

По полученным данным следует, что низкочастотный характер пульсаций давления и высокая амплитуда позволяют достигать высокую степень дисперсности НКЭ.

За 2015 г. выполнены работы по интенсификации притока нефти методом направленной кислотной обработки с использованием НКЭ, приготовленной с помощью кавитационного смесителя, на 6 объектах РУП "Производственное объединение "Белоруснефть". При среднем базовом дебите 5 т/сут средний прирост его после проведения работ составил 4 т/сут, длительность эффекта более 190 сут, на начало 2016 г. по большинству скважин, на которых проводились работы, эффект продолжается.

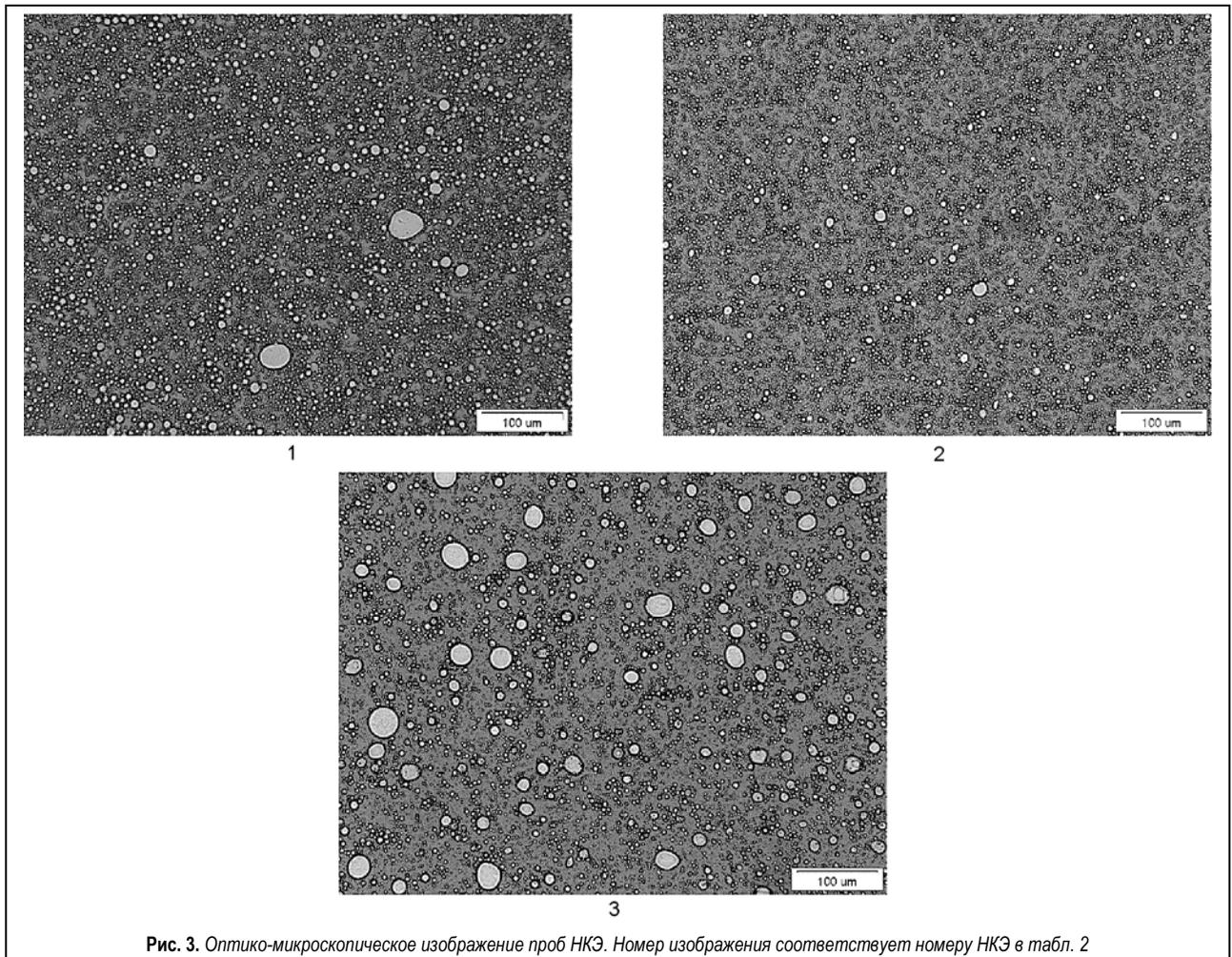


Рис. 3. Оптико-микроскопическое изображение проб НКЭ. Номер изображения соответствует номеру НКЭ в табл. 2

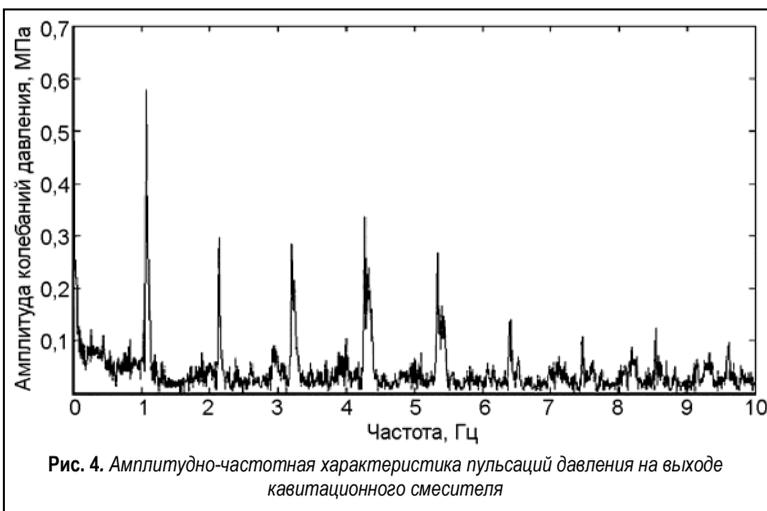


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика пульсаций давления на выходе кавитационного смесителя

Результаты лабораторных и промысловых испытаний разработанного кавитационного смесителя позволяют сделать следующие выводы:

– нефтекислотные эмульсии, приготовленные с использованием смесителя гидродинамического кавитационного, по технико-эксплуатационным характеристикам превосходят эмульсии, приготовленные с использованием смесителя, работающего на основе струйных форсунок;

– благодаря устройству кавитационно-го смесителя (отсутствие подвижных частей, контактирующих с агрессивными компонентами НКЭ) повышены надежность и долговечность предлагаемого устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токунов В.И., Саушин А.З. Технологические жидкости и составы для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 2004. – 712 с.
2. Эффективность технологий воздействия на нефтяной пласт / Н.А. Демяненко, В.Г. Пысенков, А.И. Гавриленко [и др.] // Нефт. хоз-во. – 2004. – № 11. – С. 38–40.
3. Рогоза З.И., Яковлева Н.С., Вогородский В.М. Применение кислотно-углеводородных эмульсий – один из путей восстановления продуктивности нефтяных скважин // Тр. БашНИПИнефть, 1989. – Вып. 80. – С. 21–24.
4. Моделирование гидродинамических процессов при кавитационно-импульсной кислотной обработке нефтедобывающих скважин / Д.В. Ткачев, А.И. Столяров, А.М. Селютин, В.М. Ткачев // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2014 г.

/ М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, ОАО "Компания "Сухой" / под общ. ред. С.И. Тимошина. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – С. 79–80.

LITERATURA

1. Tokunov V.I., Saushin A.Z. *Tekhnologicheskie zhidkosti i sostavy dlya povysheniya produktivnosti neftyanykh i gazovykh skvazhin*. – M.: Nedra, 2004. – 712 s.
2. *Effektivnost' tekhnologiy vozdeystviya na neftyanoy plast* / N.A. Demyanenko, V.G. Pysenkov, A.I. Gavrilenko [i dr.] // *Nef. khoz-vo*, 2004. – № 11. – С. 38–40.

3. Rogoza Z.I., Yakovleva N.S., Vogorodskiy V.M. *Primenenie kislotno-uglevodorodnykh emul'siy – odin iz putey vosstanovleniya produktivnosti neftyanykh skvazhin* // *Tr. BashNIPIneft'*, 1989. – Вып. 80. – С. 21–24.

4. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov pri kavitatsionno-impul'snoy kislotnoy obrabotke neftedobyvayushchikh skvazhin* / D.V. Tkachev, A.I. Stolyarov, A.M. Selyutin., V.M. Tkachev // *Sovremennye problemy mashinovedeniya: tez. dokl. X Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (nauch. chteniya, posvyashch. P.O. Sukhomu)*, Gomel', 23–24 okt. 2014 g. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, ОАО "Компания "Сухой" / под общ. ред. С.И. Тимошина. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – С. 79–80.

РУП "Производственное объединение "Белоруснефть" БелНИПинефть

246003 Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Книжная, 15б.
E-mail: d.tkachev@beloil.by

Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого"

246746 Республика Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48.
Тел.: +375232400317
E-mail: vmtkachev@gstu.by
