

УДК 532.5.13;533.6.011; 534.8

Исследование влияния электрического разряда, ударно-волновых и акустических процессов в пузырьковой жидкости на реологические свойства нефти и нефтепродуктов

В. Ю. Великодный, А. И. Крикунова

Проведены экспериментальные исследования воздействия ударных и акустических волн на смесь воды и мазута, а также воды и тяжелой нефти. В ряде экспериментов используемая вода предварительно подвергалась обработке электрическим разрядом. Получены смеси воды и нефтепродуктов со значительным уменьшением вязкости. Устойчивая водно-мазутная эмульсия сохраняет цвет исходного сырья.

PACS: 89.30.aj

Ключевые слова: нефть, вязкость, ударные волны, акустические волны, электрический разряд.

Введение

В связи с истощением традиционных энергетических ресурсов планеты, так называемая тяжелая нефть приобретает все большую значимость в мировой экономике. Для России это обстоятельство имеет особенное значение, так как за последнее время на парафинистую и высокопарафинистую нефть приходится около 70 % всей добываемой нефти [1]. Россия занимает третье место в мире по разведанным запасам тяжелой нефти после Канады и Венесуэлы [2]. Соответственно, упрощение ее добычи и транспортировки является актуальной научно-технической задачей.

Затруднение транспортировки высокопарафинистой нефти происходит из-за присутствия в ней твердых кристаллов парафина. Температура плавления парафинов составляет 20—70 °С, и в процессе охлаждения нефти парафин выпадает в виде мелких игольчатых кристаллов. Смолы и асфальтены также оказывают значительное влияние на вязкость. Асфальтеновые вещества, находящиеся в дисперсном состоянии в составе парафинистых нефтепродуктов, при охлаждении адсорбируются на ребрах и вершинах кристаллов, образуя дополнительные центры кристаллизации. В результате, парафинистая сетка становится значительно более плотной и прочной [3].

Для поиска рациональных путей снижения вязкости парафинистой нефти в данной работе пред-

ставлены экспериментальные исследования воздействия ударных и акустических волн, электрического разряда на реологические характеристики высоковязкой нефти, нефтепродуктов и их смесей с водой.

Классификация типов жидкости

Как известно, одна и та же нефть при различных температурах может вести себя как ньютоновская жидкость, так как и неньютоновская разных типов. Кривая течения для ньютоновских сред имеет вид прямой. В таких жидкостях вязкая диссипация энергии обусловлена столкновением небольших молекул. Если же скорость в каждой точке среды является простой функцией напряжения сдвига в этой же точке, то такая жидкость называется неньютоновской вязкой. В зависимости от вида функции бывают бингамовские пластичные, псевдопластичные и дилатантные жидкости. Для бингамовских пластиков кривая течения имеет вид прямой, исходящей из некоторой точки оси напряжения сдвига τ . Если приложенное напряжение превышает предел текучести τ , то возникает вязкое течение. Причиной такого поведения данного типа жидкости является наличие у покоящейся жидкости пространственной структуры, т. е. некоторой жесткости, разрушающейся при определенном напряжении τ . А при уменьшении напряжения структура вновь возвращается к первоначальному виду. У псевдопластиков предел текучести отсутствует, и зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ имеет вид $\tau = k\dot{\gamma}^n$, $n < 1$. Данный тип поведения характерен для суспензий, содержащих ассиметричные частицы, и растворов высокополимеров. С возрастанием скорости сдвига такие частицы ориентируются вдоль направления пото-

Великодный Василий Юрьевич, старший научный сотрудник.
Крикунова Анастасия Игоревна, стажер-исследователь.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 127412, Москва, Ижорская ул., 13/19.
E-mail: vvelikodny@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2012 г.

© Великодный В. Ю., Крикунова А. И., 2012

ка, и вязкость уменьшается до тех пор, пока не исчезнет возможность дальнейшего ориентирования молекул. Вязкость дилатантных же сред наоборот возрастает с повышением скорости сдвига. Закон используется такой же, но с учетом, что $n > 1$. Такие свойства объясняются большим содержанием твердой фазы.

Жидкости, вязкость которых зависит от продолжительности сдвига, разделяют на тиксотропные и реопектические. Тиксотропные среды — это те, у которых вязкость снижается с течением времени при постоянной скорости сдвига из-за разрушения структуры. Тиксотропия — это обратимый процесс, т. е. после исчезновения возмущений структура жидкости возобновляется. Реопектическим материалам свойственно постепенное структурообразование при небольших сдвигах.

Вязкоупругим называется материал, проявляющий как упругое восстановление формы, так и вязкое течение [4].

Различные типы газожидкостных течений

Пузырьковым режимом течения является таковой, при котором дисперсной фазой является газ, причем размер включений — много меньше размеров течения. Как правило, такие течения стабильны при газосодержании менее 30 % по объему, иначе образуется снарядный режим течения или пленочный [5]. При снарядном и пленочном течениях резко снижается поверхность межфазного обмена и взаимодействия. Это негативно сказывается на кинетике физико-химических процессов в гетерогенных средах. В этом смысле пузырьковый режим течения является наиболее оптимальным. Эффективность его увеличивается при уменьшении размера пузырьков и увеличении объемного газосодержания. Практическая реализация пузырькового режима течения при объемном газосодержании выше 30 % является непростой научно-технической задачей [6]. Существует несколько способов стабилизации режима течения, например, турбулизация газодисперсного потока, а также ударно-волновая и акустическая обработка [7].

Физические процессы, происходящие при обработке

Далее описывается работа установки, в которой обработка нефти производится ударными и акустическими волнами. При воздействии акустических волн ультразвукового диапазона интенсивно происходит процесс перемешивания, диспергирования и, в конечном итоге, реализуется кавитация.

Кавитационная обработка ускоряет диффузию нефти в полости парафина, интенсифицирует процесс его разрушения. Ускорение растворения парафина идет за счет интенсификации перемешивания нефти на границе нефть—парафин и действия импульсов давления, которые как бы разбрызгивают частицы парафина. Кавитация разрывает непрерывную цепочку молекул, разрушая связи между отдельными частями молекул, влияет на изменение структурной вязкости, т. е. на временный разрыв ван-дер-ваальсовых связей. Под воздействием ударных волн большой интенсивности на протяжении длительного времени нарушаются С—С связи в молекулах парафина, вследствие чего происходит изменение физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.) и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.). В процессе импульсной кавитационной обработки нефти и нефтепродуктов энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений [8].

Для разрыва связей в молекулах углеводородных соединений необходимо обеспечить многофакторное энергетическое воздействие в импульсной форме. Энергия диссоциации связи С—Н в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы колеблется в пределах 322—435 кДж/моль, энергия диссоциации связи С—С, соответственно, изменяется в интервале 250—348 кДж/моль. При разрыве связи С—Н от углеводородной молекулы отрывается водород, при разрыве связи С—С углеводородная молекула разрывается на две неравные части.

При кавитационной обработке углеводородного сырья происходит деструкция молекул, вызванная микрокрекингом молекул и процессами ионизации. В результате протекания этих процессов в системе накапливаются "активированные" частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования [8].

В ходе плазменной обработки также происходит ускорение разрыва связей в углеводородных молекулах [9].

Описание схемы и рабочего процесса

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1, состоит из двух основных частей.

В первой части происходит обработка нефтепродуктов ударными и акустическими волнами (обеспечивающими процесс кавитации). Она состоит из емкости для подачи топлива 10, насосов

12 и 13, кавитатора 1, а также вычислительного блока. В кавитатор, изображенный отдельно на рис. 2, входит завихритель 15, сопло 18 и полая трубка-протектор 25 с микрометрическим винтом 23. Насос 12 (см. рис. 1) служит для устранения эффекта расслоения воды и нефтепродуктов, т. е. он отбирает воду с нижней части бака для подачи топлива и нагнетает ее к входу в насос 13, который перекачивает далее по установке смесь воды и топлива, а не просто воду. В процессе перекачки по контуру жидкость нагревается. После насоса 13 стоит кавитатор, на входе которого расположен завихритель 15 (см. рис. 2). Он закручивает поток, тем самым, структурируя жидкость и увеличивая количество пузырьков в центре потока. Далее эта жидкость проходит через сопло 18. Давление на выходе значительно снижается, и смесь вскипает, обеспечивая дополнительное образование пузырьков. Сопло ускоряет как прямолинейное движение жидкости, так и вращательное. В целом выделенный элемент жидкости и пара движется по спирали. На выходе из сопла пузырьки скапливаются в центре потока и попадают в трубку-отбойник 25, где возникают ударные волны, так как скорость звука в пузырьковой среде (т. е. при высоком объемном газосодержании) может быть на порядок меньше, чем в газе, и на два порядка меньше, чем в жидкости [10]. В свою очередь, ударные волны, взаимодействуя с полой трубкой-отбойником 25, из-за неустойчивости такого типа течения порождают за фронтом акустические волны, перемешивающие рабочее вещество и дробящие воду на капли. При этом крайний слой жидкости тормозится ребрами 21 (см. рис. 2) и уносится в выходное отверстие 9 (см. рис. 1).

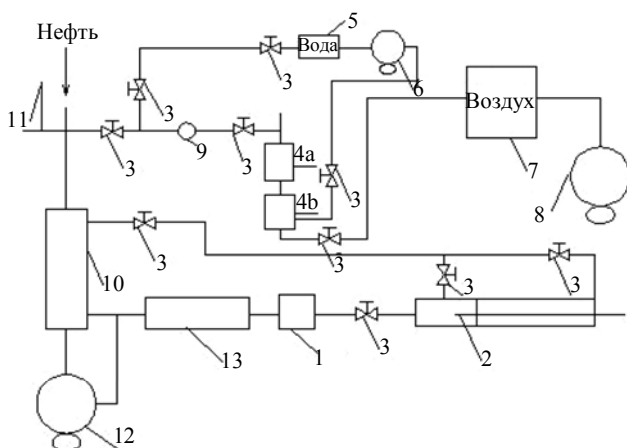


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — кавитатор; 2 — трубка-отбойник с микрометрическим винтом; 3 — запорная арматура; 4а — плазменная ячейка; 4б — барботажная ячейка; 5 — бак с водой; 6 — насос перекачивающий; 7 — ресивер; 8 — компрессор; 9 — расходомер жидкости; 10 — емкость для подачи топлива; 11 — трубка для сброса газов; 12 — насос для перемешивания воды и топлива; 13 — насос для нагнетания смеси в кавитатор

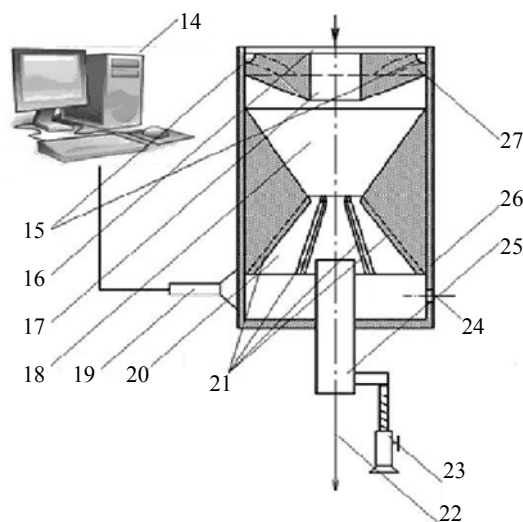


Рис. 2. Схема кавитатора с вычислительным блоком:

14 — вычислительный блок; 15 — каналы завихрителя; 16 — входное отверстие; 17 — дроссель; 18 — сопло Лавалю; 19 — акустический датчик; 20 — расширяющаяся часть сопла Лавалю; 21 — тормозные ребра; 22 — прямое выходное отверстие; 23 — микрометрический винт; 24 — боковое выходное отверстие; 25 — трубка-отбойник; 26 — корпус кавитатора; 27 — корпус завихрителя

Компьютерный блок (см. рис. 2) включает в себя осциллограф-приставку Welleman, акустический датчик 19 и персональный компьютер 14. При помощи микрометрического винта меняются параметры настройки колебательного контура, а показания осциллографа помогают настраивать систему на резонанс, что приводит к наиболее эффективной обработке. Таким образом, в кавитаторе происходит воздействие на молекулы углеводородов и интенсивное перемешивание составляющих компонентов смеси.

Во второй части установки вода проходит плазменную обработку. Основными элементами установки (см. рис. 1) являются: ресивер 7, компрессор 8, перекачивающий насос 6, плазменная ячейка 4а, барботажная камера 4б, емкость для воды 5, расходомер жидкости 9. Из емкости 5 при помощи перекачивающего насоса 6 вода попадает в барботажную ячейку 4б, где происходит насыщение воды пузырьками воздуха. Из ресивера сжатый воздух (под давлением 6 атмосфер) поступает снизу через пористую титановую пластину (средний диаметр пор составляет 120 мкм, пористость 60 %) в барботажную камеру 4б. В боковое отверстие камеры подается вода через трубку с внутренним диаметром 5 мм. Трубка направлена вдоль поверхности титановой пластинки, чтобы обеспечить смывание с пористой пластинки образующиеся пузырьки воздуха. При этом пузырьки отрываются значительно раньше, чем в стоячей жидкости, и их диаметр составляет не более 1 мм.

Одним из основных параметров газожидкостной смеси является отношение объема газа к объ-

ему занимаемой смеси, т. е. газосодержание ф. Барботажная система, которая используется в установке, позволяет получать смесь с газосодержанием ϕ от 0 до 0,9, при этом дисперсность составляет от 0,1 до 2 мм. Далее поток газо-пузырьковой смеси стабилизируется за счет ускорения и турбулизации в инжекторе и попадает в плазменную ячейку 4а. Разряд зажигается между кольцевым электродом, расположенным на внутренней стенке плазменной ячейки, и стержневым электродом, размещенном на оси ячейки. Питание плазменного реактора производится с помощью входного трансформатора, позволяющего менять выходное напряжение от 0 до 127 В, и последующего высоковольтного трансформатора с максимальным выходным напряжением 2,5 кВ и током до 3 А. Вкладываемая мощность в систему достигает 7,5 кВт. Центральный электрод выполнен в виде звезды с шестью заостренными зубцами, что позволяет уменьшить пробойное напряжение за счет усиления напряженности электрического поля у остриев.

Объемно-диффузионный разряд протекает по поверхности раздела фаз вода—воздух. Поэтому наличие пузырьков увеличивает эффективность данного метода обработки в сотни раз по сравнению с такой же обработкой, но без пузырьков. Далее вода, обработанная таким образом, смешивается с нефтепродуктами в первой части установки, где уже запущен процесс кавитации.

Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводится в следующем порядке. В начале установка прогревается при помощи парогенератора, затем разогретые нефтепродукты (60 °С) в объеме 2 л заливаются в установку, и затем включается кавитатор на 15 мин. При ударно-волновой обработке пробы нефтепродуктов берутся через 5, 10 и 15 мин после включения установки. Аналогичная обработка проводится для смеси воды и нефтепродуктов.

Плазменная обработка воды — активация — продолжается 10 мин, после чего обработанная вода в кавитаторе смешивается с нефтепродуктами в течение 15 мин. Пробы смеси берут, соответственно, через 5 и 10 мин.

Зависимость сдвигового напряжения τ от скорости сдвига γ для полученных образцов измеряется при помощи ротационного вискозиметра. Полученные смеси рассматривались также в оптический микроскоп с увеличением до 4000 раз.

Результаты

Полученные, при измерении на ротационном вискозиметре зависимости напряжения сдвига τ от

сдвиговой скорости γ для 2 л чистой нефти, обработанной в кавитаторе, представлены на рис. 3. Данная зависимость была построена через 2 дня после проведения эксперимента. На рис. 4 представлена зависимость для того же экспериментального образца, но полученная уже спустя 3 мес после обработки. Видно, что при кавитационной обработке вязкость значительно падает, по сравнению с первоначальной, в течение первых 5 мин обработки, а дальнейшая обработка не дает практически никаких результатов.

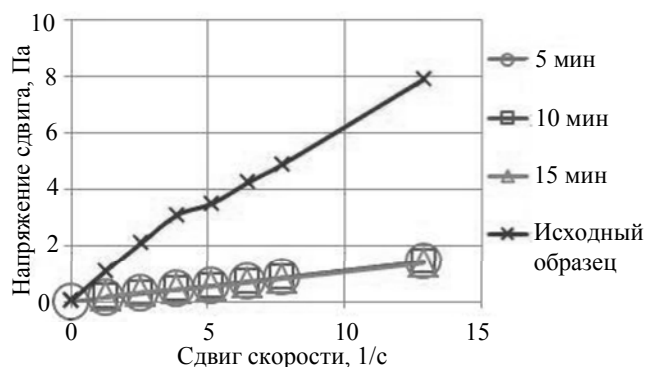


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от сдвиговой скорости для 2 л чистой нефти, обработанной в кавитаторе, через 2 дня после эксперимента

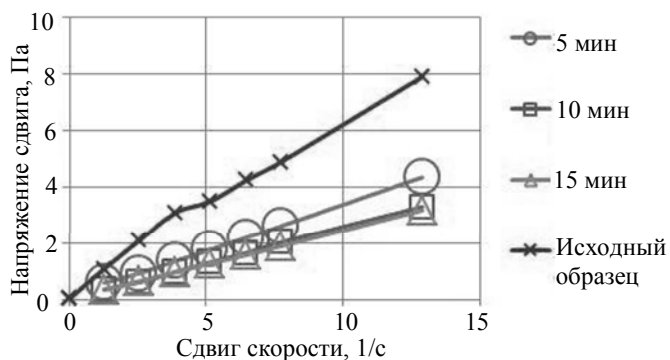


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от сдвиговой скорости для 2 л чистой нефти, обработанной в кавитаторе, через 3 мес после эксперимента

При обработке в кавитаторе смеси воды и нефти получили стойкие водо-топливные эмульсии с различным процентным содержанием воды вплоть до 30 %. Исследования смеси нефти с "активированной" водой показали, что при этом вязкость смеси продолжает монотонно меняться с течением времени обработки.

Исходя из экспериментальных результатов, можно сделать вывод, что эффект воздействия на реологические свойства смесей нефтепродуктов с водой с течением времени теряет силу и вязкость снова увеличивается. При исследовании образцов смеси воды и мазута с помощью микроскопа было обнаружено, что они представляют собой взвесь мазута с включениями в виде капелек воды размером 70 мкм (эмульсия). Отметим важный факт, что

цвет полученной эмульсии имеет цвет исходного вещества (нефти, мазута).

Снижение вязкости для смесей мазута и воды увеличивает эффективность распыления смеси в форсунках при сжигании в топках, а также позволяет снизить энергетические затраты на нагрев топлива. Наличие воды в углеводородах позволяет экономить топливо, повышает экологические показатели. При этом полная энтальпия сгорания не снижается по сравнению с исходным углеводородным сырьем [11].

Заключение

Исследования показали, что воздействие на нефть и нефтепродукты акустическими, ударно-волновыми и плазменными способами приводят к значительному изменению их вязкостных свойств.

Выдвинута гипотеза об изменении кластерной структуры воды в процессе ее плазменной "активации". Это предположение основано на том, что со временем вязкость экспериментальных образцов обратно восстанавливается. Если бы происходил разрыв связей, т. е. образовывались новые продукты в виде спиртов и углеводородов, то вяз-

кость бы уже не изменялась во времени, так как этот процесс необратимый.

Литература

1. Борисов Д. Н., Фахретдинов П. С., Романов Г. В. // Нефтегазовое дело. 2007. [Электронный ресурс]. http://www.ogbus.ru/authors/Borisov/Borisov_1.pdf
2. Данилова Е. // The Chemical Journal. Декабрь 2008. С. 34.
3. Сайт Promti.ru
4. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. — М.: Мир, 1964.
5. Быков А. А. Исследование газожидкостных характеристик электрического разряда в процессах очистки промышленных и бытовых сточных вод // Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — М., 2011.
6. Бушманов Е. А., Великодный В. Ю., Воротилин В. П., Яновский Ю. Г., Тимофеев И. Б., Д. Ван Ви. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 49.
7. Великодный В. Ю., Быков А. А. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. № 10. С. 26. www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-10-26-001.pdf
8. Промтов М. А., Авсеев А. С. // Нефтепереработка и нефтехимия. 2007. № 6. С. 22.
9. Сайт ООО «НПП "ЭкоЭнергоМаш"» <http://www.eemkzn.ru/product/plazma/pererabotka-nefti/>
10. Циклаури Г. В., Данилин В. С., Селезнев Л. И. Адиабатные двухфазные течения. — М.: Атомиздат, 1973.
11. Бирюков А. Л. Улучшение эксплуатационных и экологических показателей бензиновых двигателей путем применения топливно-водных смесей // Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — СПб., 2011.

Studies of impact of the electric discharge, shock wave and acoustic processes in a bubble liquid on petroleum rheological properties

V. Yu. Velikodny, A. I. Krikunova

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
13/19 Izhorskaya str., Moscow, 127412, Russia
E-mail: vvelikodny@mail.ru

Impact of the electric discharge, shock wave and acoustic processes in a bubble liquid on petroleum rheological properties are studied in this work.

PACS: 89.30.aj

Keywords: petroleum, viscosity, shock waves, acoustic waves, electric discharge.

Bibliography — 11 references.

Received April 20, 2012