

СНИЖЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕФТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

© В. В. Лыков, Л. Ш. Махмудова, М. Х. Джабраилова, Х. Ш. Лаиева
ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В работе исследовалось воздействие импульсного плазменного (ИПВ) электрогидравлического разряда на реологические свойства нефтей с месторождений Октябрьское и Старогрозненское Чеченской Республики и Зимняя Ставка Ставропольского края. В результате ИПВ наблюдалось снижение вязкости нефти с месторождения Октябрьское на 15%, с месторождения Старогрозненское – на 25%, с месторождения Зимняя Ставка – на 50%. Показана зависимость степени снижения вязкости после ИПВ от содержания парафинов в нефти. Чем больше процент содержания парафинов, тем больше процент снижения вязкости. Время восстановления вязкости после ИПВ (время релаксации) превышало 7 дней, что позволяет транспортировать нефти на большие расстояния, существенно сокращая затраты на путевые подогреватели и насосы. Можно ожидать сокращение затрат на борьбу с парафиновыми отложениями на стенках трубопроводов (АСПО) и насосно-компрессорных труб (НКТ) из-за снижения концентрации парафинов при ИПВ.

Ключевые слова: вязкость нефти, импульсный плазменный электрогидравлический разряд, снижение вязкости, время релаксации.

Высокая вязкость является основным фактором, влияющим на себестоимость транспортировки нефти. В настоящее время основными методами снижения вязкости нефти являются нагрев путевыми подогревателями и введение химических добавок (ингибиторов). Путевые подогреватели энергоемки, а ингибиторы имеют высокую стоимость и требуют индивидуального подбора для каждой нефтяной жидкости. Ситуация с применением химических растворителей особенно остро стоит в трубопроводах. Например, в Канаде, испытывающей острый недостаток нефтепроводов, от 20% до 40% пропускной способности трубопровода затрачивается на транспортировку растворителей, что создает дополнительные издержки от \$2 до \$8 на баррель [1].

В работе исследовалось воздействие импульсного плазменного (ИПВ) электрогидравлического разряда и сопровождающего его ударных волн (УВ) на вязкость нефти и время восстановления (релаксации) вязкости после воздействия.

Электрический разряд в жидкости сопровождается комплексом физических и химиче-

ских явлений, как то высокие и сверхвысокие импульсные гидравлические давления и связанные с ними ударные волны (УВ), мощные кавитационные процессы, механические напряжения, приводящие к разрушению вещества, интенсивное тепловое и электромагнитное излучение [2].

Механизм формирования ударных волн (УВ) при электрическом разряде в жидкости поясняется на рисунке 1 [3]. После пробоя жидкости плазма разрядного канала, имеющая начальную температуру $\sim 10^4$ К, расширяется со скоростью порядка $(3-5) \cdot 10^3$ м/с, что приводит к зарождению и эволюции УВ, сопровождающейся ростом перепада давления на фронте в несколько сот и даже тысяч атм на расстояниях около 3-5 мм от оси плазменного канала. По мере удаления от оси канала температура и скорость расширения плазменного образования быстро снижаются, и оно постепенно трансформируется в кавитационный парогазовый пузырь, который затем схлопывается под действием внешнего давления [1].

Развитие процесса происходит в течение нескольких сот нсек. При больших амплитудах

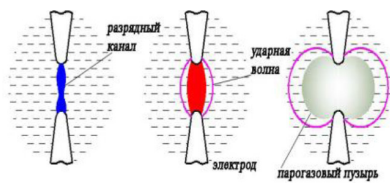


Рис. 1. Формирование парогазового пузыря при высоковольтном электрическом разряде в жидкости [3].

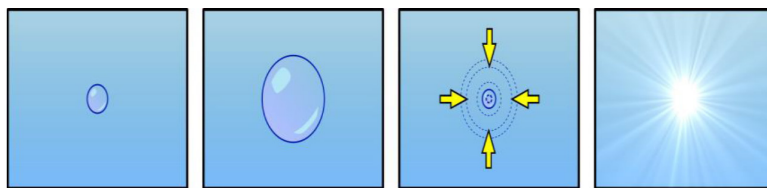


Рис. 2. Эволюция кавитационного парогазового пузыря в жидкости и его схлопывание под действием внешнего давления, приводящее к возникновению УВ [1].

разрядного импульса толщина фронта УВ может быть менее 10 нм, что значительно меньше характерного размера большинства многих высокомолекулярных соединений в нефтяной и других жидкостях, являясь физической основой разрушения объектов с размерами большими, чем фронт УВ, например, микроорганизмы и вирусы, твердые частицы и их скопления [4].

Основа для изменения реологических свойств нефтяной жидкости при ИПВ состоит в создании в ней ударных акустических волн сжатия-растяжения большой мощности с перепадом давления в несколько сот атмосфер, в результате которых происходят мощные кавитационные процессы. Кавитация и возникающие при этом акустические ударные волны разрывают непрерывную цепочку молекул, разрушая связи между отдельными частями молекул, что влияет на изменение структурной вязкости, т.е. на временный разрыв Ван-дер-Ваалевских связей. Под воздей-

ствием ударных волн большой интенсивности 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.). Выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков энергия используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений [5].

На рисунке 3 показаны экспериментальные результаты разрыва высокомолекулярных парафиновых соединений. До ИПВ характерный размер высокомолекулярных соединений нефти с высоким содержанием парафинов составлял несколько микрон, после ИПВ структуры распались на отдельные фрагменты с размерами несколько десятков нм. Одновременно происходит снижение кинематической вязкости на 15-25% в зависимости от типа нефти

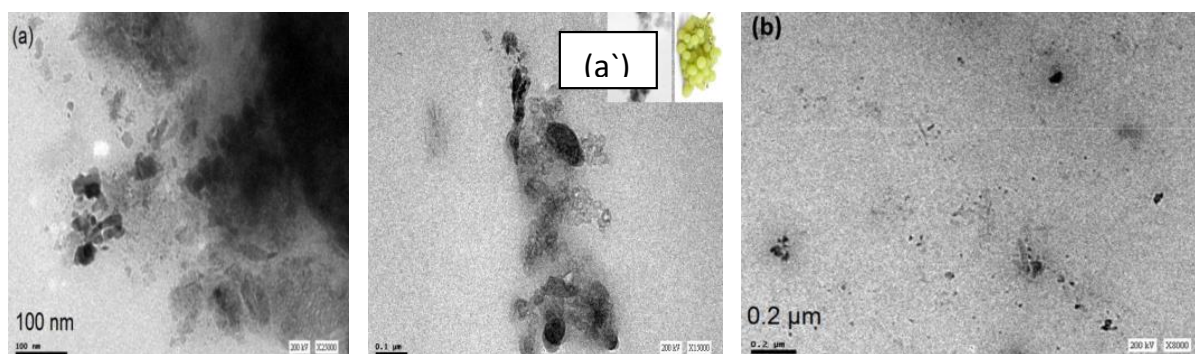


Рис. 3. Воздействие импульсного плазменного электрического разряда («arc discharge process») на структуру парафинов в нефти:

- а), а') начальная структура парафинов до воздействия разряда состоит из множества слоев на основе углеродов;
- б) рассеянные при ИПВ наночастицы («dispersed nanoparticles») парафинов с размером 10-100 нм. May 2015, ESTL, Dallas [6]

10-100 нм. May 2015, ESTL, Dallas [6]

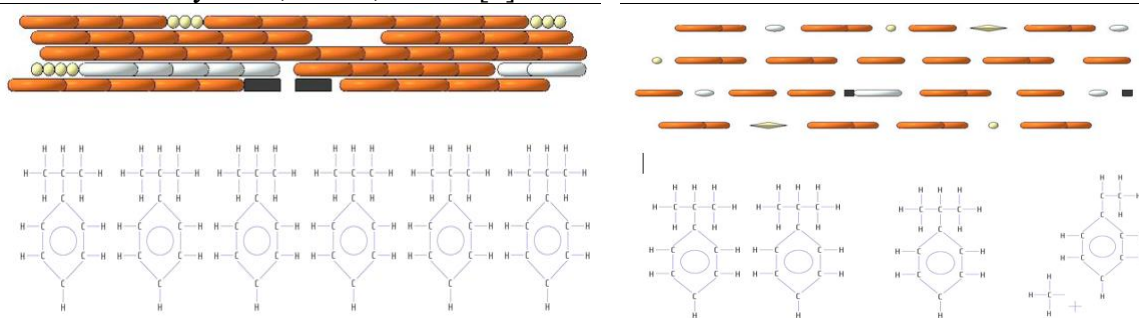


Рис. 4. Схема деполимеризации высокомолекулярных соединений под действием акустических ударных волн. Левый рисунок – структура молекулярных соединений до воздействия. Правый рисунок – после воздействия акустической волны [1].

[6]. Схематично на рисунке 4 показан процесс разрыва высокомолекулярных полимерных соединений под действием акустических волн при ИПВ [1].

В результате ИПВ происходит снижение вязкости нефти и нефтепродуктов на 10-30% [5-8], а также снижение концентрации высокомолекулярных парафиновых соединений в нефти на 15-20% [8]. Однако время восстановления вязкости (релаксации), что является важнейшим параметром для транспортировки нефтепродуктов по трубопроводу, изучено недостаточно. Предпочтительное время релаксации должно быть не менее трех дней, что позволяет транспортировать нефть без дополнительных энергозатрат на подогрев на необходимое расстояние.

Экспериментальная часть. В экспериментах изучалось ИПВ на нефти с месторождений Ставропольского края и Чеченской Республики.

Воздействие на нефть осуществлялось в реакторе высокого давления, в котором создавался импульсный высоковольтный электрический разряд. Электрический разряд создавался генератором высоковольтных импульсов. Амплитуда импульса составляла 25 кВ, длительность около 10 мкс, энергия одиночного импульса 800 Дж. Количество импульсов, амплитуда и энергия импульсов варьировались.

Измерялись вязкость нефти и температура застывания (потери текучести) до и после воздействия. Измерение вязкости нефти осуществлялось на ротационном вискозиметре

Brookfield DV-II+Pro с термостатированием криотермостатом LOID с точностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Измерение температуры застывания (потери текучести) производилось на автоматическом приборе АТЗ-02. Подготовка образцов нефти для ИПВ и дальнейшего измерения осуществлялась по ГОСТ 33910-2016.

Производилось ИПВ на нефть ЦДГН-4, месторождение Октябрьское, Шалинский район, Чеченская Республика. Нефть содержит 6,6% парафинов, 3,72% смол и 0,23% асфальтенов [9]. В результате ИПВ снижалась на 15-18% с ~ 17 сПа до ~ 14 сПа (рис. 5). Температура изменения вязкости $+20^{\circ}\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. При ИПВ также снижалась температура застывания (потери текучести) в среднем на 8 градусов с $+9$ град С до $+1$ град С.

Осуществляли ИПВ на нефть ЦДГН-3 месторождение Старогрозненское, Старопромысловский район, Чеченская Республика. Нефть Старогрозненского района относится к типу метановых нефтей, характеризуется чёрным цветом и низкой прозрачностью с содержанием парафинов 9,6% смол 3,27% и асфальтенов 0,58% [9]. ИПВ. В результате воздействия вязкость нефти снижалась в среднем на 25% с 14,3 сП до 11,5 сП (рис. 6). Температура измерения вязкости $+20^{\circ}\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Кроме того, нефть становилась более однородной, что отражается на кривой зависимости вязкости, на которой уменьшается амплитуда колебаний вязкости после ИПВ.

Нефти месторождения Зимняя Ставка Ставропольского края обладают аномально вы-

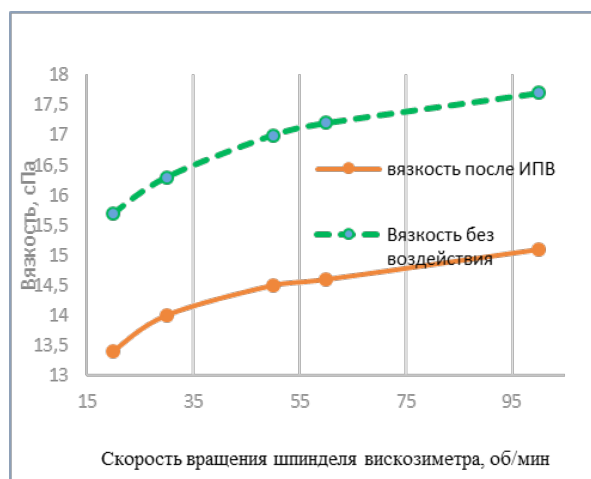


Рис. 5. Зависимость вязкости нефти от скорости вращения шпинделя до и после ИПВ. Месторождение Октябрьское, Шалинский район, ЧР.

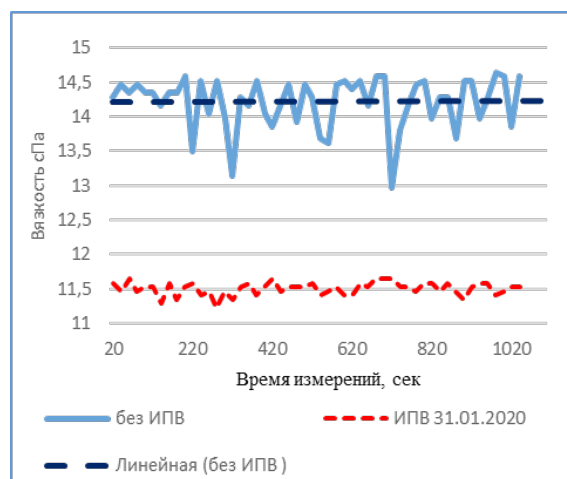


Рис. 6. Зависимость вязкости нефти от времени измерения до и после ИПВ. Месторождение Старогрозненское, Старопромысловский район, ЧР.

соким содержанием парафинов, что делает указанную нефть наиболее благоприятным объектом для снижения вязкости методами ИПВ.

По своим свойствам нефти месторождения Зимняя Ставка – легкие, парафинистые, малосмолистые и бессернистые. Температура застывания около +38°С. Такие нефти имеют сложные высокомолекулярные соединения, склонные к структурообразованию, как то парафины, смолы и асфальтены. Отличительной особенностью нефти Зимняя Ставка является высокое содержание твердых углеводородов – парафинов. На них приходится почти половина (41,3%) общей массы нефти. Доля смол и асфальтенов мала и составляет соответственно 3,4 и 0,5% [10].

Измерялись динамическая вязкость нефти без воздействия (БВ) и вязкость после воздействия (ИПВ). Вязкость обработанной нефти измерялась ежедневно в течение 7 дней после ИПВ.

На рисунке 7 показаны кривые зависимости вязкости от времени измерения без воздействия и после воздействия в течение первых трех дней (усреднено за первые три дня после ИПВ). Среднее значение вязкости без ИПВ составило 520 сП, после ИПВ – 250 сП, то есть снижение вязкости более чем в два раза.

На рисунке 8 отображен процесс релаксации (восстановления) вязкости после ИПВ.

Повышение вязкости к значениям до воздействия происходит достаточно медленно. За 7 дней после ИПВ вязкость смогла восстановиться не более чем на 35%, с 230 сП до 350 сП. Восстановление вязкости в первые три дня после ИПВ практически не происходит. Вязкость начинает расти (восстанавливаться) только на 5 день после ИПВ.

Результаты. Импульсный плазменный высоковольтный разряд и инициированные им мощные ударные волны в нефтяной жидкости приводят к разрушению больших высокомолекулярных соединений на более мелкие образования и их рассеяние, изменяя групповой состав нефти. Результатом процесса поле ИПВ является изменение реологических свойств нефти, и прежде всего изменение главного реологического свойства нефти – вязкости. После ИПВ происходит *необратимое снижение вязкости* в пределах времени ее релаксации, которое может достигать нескольких месяцев.

Согласно эмпирической формуле Ивановой Л. В. зависимость вязкости нефти от группового компонентного состава можно описать формулой [11]:

$$\text{Вязкость (50}^\circ\text{C)} = 2,95 + 0,0021 \cdot \text{C} \cdot \text{П} + 0,0112 \cdot \text{A} \cdot \text{П},$$

где С – смолы, П – парафины, А – асфальтены.

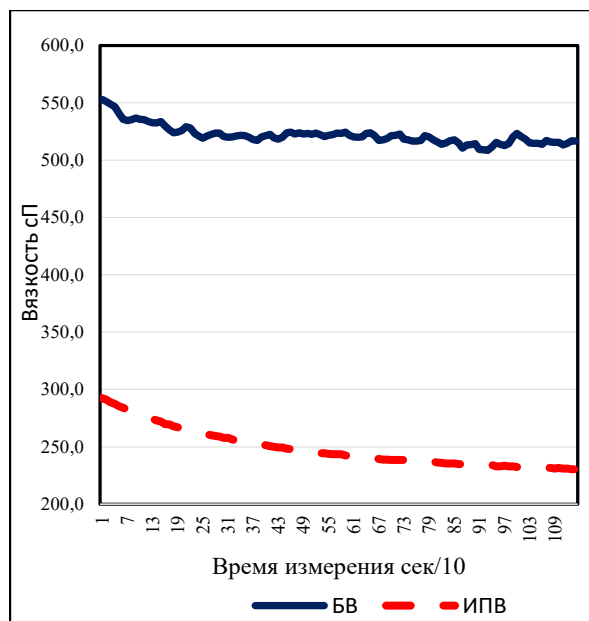


Рис. 7. Зависимости динамической вязкости нефти от времени вращения шпинделя вискозиметра без воздействия (БВ) и после воздействия (ИПВ).

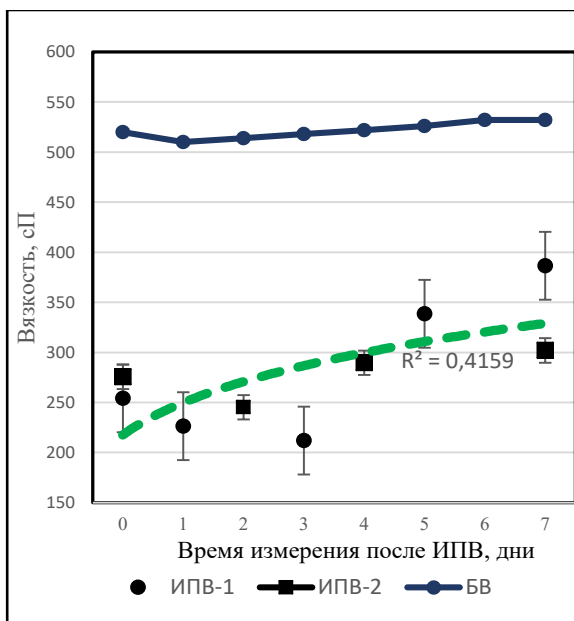


Рис. 8. Зависимость вязкости нефти от времени измерения (время релаксации) после ИПВ. Верхняя кривая – вязкость без воздействия (БВ). Нижняя кривая – аппроксимация вязкости после ИПВ.

Как следует из формулы, основной вклад в вязкость оказывает содержание парафинов. Именно снижением концентрации высокомолекулярных парафиновых соединений после ИПВ объясняется снижение вязкости, а ее снижение более чем в два раза на нефти месторождения Зимняя Ставка обусловлено изначально более высоким или более низким содержанием парафиновых соединений в нефти, что наглядно демонстрируют кривые измерений вязкости нефти до и после ИПВ Грозненских и Ставропольских нефтей:

- содержание парафинов в нефти Октябрьского месторождения 6,6%, снижение вязкости после ИПВ составило 15-18%;

- содержание парафинов в нефти Старогрозненского месторождения составляет 9,6%, – снижение вязкости в результате ИПВ составляет 20-25%;

- содержание парафинов в нефти месторождения Зимняя Ставка составляет 41%, – снижение вязкости в результате ИПВ составляет более 50%.

Очевидна корреляция между степенью снижения вязкости в результате ИПВ и со-

держанием парафинов в нефтях. Чем больше процент содержания высокомолекулярных соединений в нефти, тем на больший процент можно снизить вязкость нефти после ИПВ и тем больший экономический эффект можно ожидать на транспортировку и подъем нефти по трубопроводам.

Поскольку при ИПВ снижается концентрация парафинов в нефтях, то следует ожидать сокращение затраты на борьбу с асфальтено-смоло-парафиновыми отложениями (АСПО) на стенках трубопроводов и насосно-компрессорных труб (НКТ).

В работе измерялась зависимость вязкости нефти месторождения Зимняя Ставка от времени после ИПВ. Сразу же после ИПВ вязкость снизилась от ~500 сП до ~250 сП (рис. 8). Отклонение вязкости от первоначального значения составляло 250 сП, а уменьшение отклонения в e раз ($e=2.71$) составило ~90 сП. Согласно общепринятой терминологии время релаксации есть время уменьшения отклонения в e раз от первоначального равновесного значения [12], что составляет ~410 сП. Максимальное значение вязкости через 7 дней после ИПВ составило

390 сП и не превышало 350 сП в течение 7 дней после ИПВ. Таким образом, измеренное время релаксации вязкости нефти месторождения Зимняя Ставка после ИПВ составило более 7 дней.

Полученное время релаксации снижения вязкости после ИПВ более 7 дней позволяет транспортировать нефти на большие расстоя-

ния, существенно сокращая энергозатраты на путевые подогреватели и насосы, а также расход химических ингибиторов.

Авторы благодарят компании ГРОЗНЕФТЕГАЗ и РН-СТАВРОПОЛЬНЕФТЕГАЗ за любезно предоставленные образцы нефти для исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Fomitchev-Zamilov, S. Godin. Investigation of Hydrodynamic Cavitation as a Means of Natural Crude Oil and Synthetic Biofuel. <http://docslide.us/documents/cavitation-hydrocarbon-cracking-55844d5f24826.html>, www.quantum--potential.com
2. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград: Машиностроение, 1986. 254 с.
3. Григорьев А. Л. Формирование ударных волн импульсными электрическими разрядами в воде и исследование их воздействия на преграды: Автореф. дисс. ... к. т. н. ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша». Москва, 2007.
4. Вилков К. В., Нагель Ю. А. Обеззараживающее действие мощного импульсного электрического разряда в воде. Зарождение, эволюция и структура ударных волн // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 5. С. 88-94.
5. Промтов М. А., Авсеев А. С. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2007. № 6. С. 22-24.
6. Hesham M.M. El-Sheriff, Mokhtar O.A. Mokhtar, Ali A-F. Mostafa, Badr S.N. Azzam Tribological properties of introducing carbon nanoparticles produced by arc discharge in different paraffin oil grades. STLE, 21-27 May 2015, Dallas, USA.
7. Жукова Е. М. Воздействие высоковольтного электрогидравлического разряда на физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов: Дисс. ... к. х. н. / СГУ. Саратов, 2008.
8. Технология предотвращения выпадения АСПО с одновременным снижением вязкости в скважине и нефтепроводе в режиме онлайн посредством импульсно-плазменного воздействия / Иконников Ю. А., Должанский С. К., Лыков В. В., Попов Д. С., Насветникова А. А. // «Нефть, Газ, Новации». № 12. 2017. С. 6-8.
9. Нефти СССР. Справочник. Том 3. Нефти Кавказа и Западных районов Европейской части СССР.
10. Смирнова Т. С., Серебряков А. О., Серебряков О. И. Геохимические закономерности изменения состава нефтей, газа и конденсата месторождений западного побережья Каспийского моря // Геология, география и глобальная энергия. 2012. № 2 (45). С. 55-81.
11. Иванова Л. А. Регулирование низкотемпературных свойств нефтяных систем разного уровня сложности. Дисс. ... д. х. н. РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2016. С. 195.
12. Энциклопедия физики и техники. http://femto.com.ua/articles/part_1/0603.html

REDUCING OF OIL VISCOSITY UNDER PULSE ARC ELECTROHYDRAULIC DISCHARGE

© V. V. Lykov, L. Sh. Makhmudova, M. Kh. Dzabrailova, H. Sh. Laieva
GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

The paper investigated the effect of pulsed arc electrohydraulic discharge (PAED) on the rheological properties of oil from the Oktyabrskoye and Starogroznenskoye fields in the Chechen Republic and Zimnyaya Stavka in the Stavropol territory. As a result of PAED, the viscosity of oil from the Oktyabrskoye field decreased by 15%, from the Starogroznenskoye field by 25%, and from the Zimnyaya Stavka field by 50%. The dependence of the degree of viscosity reduction after PAED on the paraffin content in oils is shown. The higher the percentage of paraffin content, the greater the percentage of viscosity reduction. The time of recovery of the viscosity after PAED (relaxation time) exceeded 7 days, which allows transport oil over long distances, significantly reducing the cost of track heaters and pumps. We expect a reduction in the cost of controlling paraffin deposits on the walls of pipelines and tubing due to a decrease in the concentration of paraffins after PAED.

Keywords: oil viscosity, pulse arc electrohydraulic discharge (PAED), viscosity reduction, relaxation time.

REFERENCES

1. Fomitchev-Zamilov, M. and Godin, S. Investigation of Hydrodynamic Cavitation as a Means of Natural Crude Oil and Synthetic Biofuel, available at: <http://docslide.us/documents/cavitation-hydrocarbon-cracking-55844d5f24826.html>, www.quantum---potential.com
2. Yutkin, L. A. (1986) 'Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primenenie v promyshlennosti' [Electrohydraulic effect and its application in industry]. *Mechanical engineering*, Leningrad. 254 p.
3. Grigorjev, A. L. (2007) Formirovanie udarnykh voln impul'snymi elektricheskimi razryadami v vode i issledovanie ikh vozdeistviya na pregrady. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni k. t. n. FGUP «Issledovatel'skii tsentr imeni M. V. Keldysha» [Formation of shock waves by pulsed electric discharges in water and investigation of their impact on obstacles. Abstract of Ph. D dissertation. Federal state unitary enterprise "Research center named after M. V. Keldysh"], Moscow.
4. Vilkov, K. V. and Nagel, Yu. A. (2004) 'Obezzarzhivayushchee deistvie moshchnogo impul'snogo elektricheskogo razryada v vode. Zarozhdenie evolyutsiya i struktura udarnykh voln. Pis'ma v ZhTF' [Disinfection effect of a powerful pulsed electric discharge in water. Origin evolution and structure of shock waves]. *Technical physics letters*, v. 30, issue 5, pp. 88-94.
5. Promtov, M. A. and Avseev, A. S. (2007) 'Impul'snye tekhnologii pererabotki nefi i nefteproduktov'. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. [Pulse technologies for processing oil and oil products. Oil refining and petrochemistry]. № 6, pp. 22-24.
6. Hesham M. M. El-Sheriff, Mokhtar O. A. Mokhtar, Ali A-F. Mostafa, Badr S. N. Azzam (2015) Tribological properties of introducing carbon nanoparticles produced by arc discharge in different paraffin oil grades. STLE, 21-27 May 2015, Dallas, USA.
7. Zhukova, E. M. (2008) Vozdeistvie vysokovol'tnogo elektrogidravlicheskogo razryada na fiziko-khimicheskie svoistva nefi i nefteproduktov [The effect of high-voltage electrohydraulic discharge on the physicochemical properties of oil and oil products]. Ph. D. thesis, SSU, Saratov.
8. Ikonnikov, Yu. A., Dolzhanskiy, S. K., Lykov, V. V., Popov, D. S. and Nasvetnikova, A. A. (2017) 'Tekhnologiya predotvrashcheniya vypadeniya ASPO s odnovremennym snizheniem vyazkosti v skvazhine i nefteprovode v rezhime onlain posredstvom impul'sno-plazmennogo vozdeistviya' Technology for preventing of ASPO with a simultaneous decrease of viscosity in the well and the oil pipeline with online mode by means of pulse arc effect. "Oil, Gas, Novations" №. 12, pp. 6-8.

9. Oil of the USSR. Guide. Volume 3. Oil of the Caucasus and Western regions of the European part of the USSR.
10. Smirnova, T. S., Serebryakov, A. O. and Serebryakov, O. I. (2012) 'Geokhimicheskie zakonomernosti izmeneniya sostava neftei, gaza i kondensata mestorozhdenii zapadnogo poberezh'ya Kaspiiskogo morya'. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*. [Geochemical regularities of changes in the composition of oil, gas and condensate of fields on the western coast of the Caspian Sea. Geology, geography and global energy]. №. 2 (45), pp. 55-81.
11. Ivanova, L. A. (2016) Regulirovanie nizkotemperaturnykh svoistv neftyanykh sistem raznogo urovnya slozhnosti. Diss. d. kh. n. RGU nefti i gaza im. I. M. Gubkina [Regulation of low-temperature properties of oil systems of various levels of complexity. D.Sc. Thesis, Russian State University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin], p. 195.
12. Encyclopedia of physics and technology, available at: http://femto.com.ua/articles/part_1/0603.html.