

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТЕКУЧЕСТЬ СЫРОЙ НЕФТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Аль-ани А.А.А., Рабатуев Г.Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Борисенко В.Е. – д-р физ.-мат. наук, профессор

Представлена математическая модель, подтверждающая снижение энергозатрат на перекачку нефти в трубопроводах за счёт снижения продольной вязкости и подавления турбулентности потока при наложении продольного электрического поля. Модель основывается на поляризации идеализированных сферических частиц асфальтенов в электрическом поле между перфорированными обкладками конденсатора, встроенного в трубопровод.

Нефть представляет собой смесь тысяч различных углеводородов: от лёгких, таких как газолин и керосин, до тяжелых асфальтенов и парафинов [1]. В связи с ежедневной интенсивной транспортировкой нефти в трубопроводах по всему миру, снижение потребляемой мощности нефтетранспортными системами является важной задачей с экологической и экономической точек зрения. Основными направлениями неэффективного расхода энергии являются трата энергии на создание турбулентности в потоке, то есть на хаотическое движение частиц, и на преодоление силы вязкого трения между слоями потока. В частности, для повышения скорости потока жидкости в трубопроводе в 2 раза, необходимо увеличить мощность насоса в 2 раза в случае ламинарного потока и в 3,4 раза при турбулентном типе течения [2]. Одним из используемых методов снижения вязкости является подогрев нефтепровода, который является довольно дорогим, однако сопровождается увеличением энергии теплового движения частиц и степенью турбулентности потока.

Сырую нефть можно идеализированно представить как взвесь сферических частиц её тяжёлых компонентов одинакового размера в лёгкой текучей среде. Для примера рассмотрим взвесь частиц асфальтена в газолине в качестве текучей среды.

Электрическими параметрами модели являются диэлектрические проницаемости асфальтенов $\epsilon_p=2,7$ и газолена $\epsilon_f=2,0$, напряженность электрического поля E в пространстве между перфорированными электродами, размещёнными поперёк трубопровода для создания продольного электрического поля.

Параметры взвеси:

- Размер частиц асфальтена, принятый $a=1,5$ нм в соответствии с моделью Йена и данных рентгеновской дифракции, согласно которым частицы асфальтена в сырой нефти имеют кристаллическую структуру и представляют собой пачечные структуры диаметром 0,9-1,7 нм из 4-5 слоев, отстоящих друг от друга на 0,36 нм [3];
- Концентрация частиц во взвеси n и соответствующее расстояние между частицами $n^{(-1/3)}$.
- Максимальная объёмная доля φ_m , которая для сферических частиц $\varphi_{сфера} = 0,64$ (64%) и эллиптической формы (вытянутых) $\varphi_{эллипс} = 0,72$ (72%);
- Динамическая вязкость базовой жидкости $\eta_0=0,0015$ Па*с;
- Величины собственной вязкости частиц ν [4] различной эллиптичности e в сонаправленном $\nu_{||}$ и перпендикулярном потоку ν_{\perp} направлениях (таблица 1). Эллиптичность определяется по формуле $e=(b-a)/b$, где b – средний размер цепочек, образующихся при агрегации частиц размера a .

Таблица 1 – Величины собственной вязкости частиц различной эллиптичности [4]

Эллиптичность частицы, e	Продольная вязкость, $\nu_{ }(e)$	Перпендикулярная вязкость, $\nu_{\perp}(e)$
0 (сфера)	2,5	2,5
0,1	2,431	2,540
0,9	2,010	4,485

Итак, по формуле Эйнштейна вязкость суспензии определяется согласно уравнению:

$$\eta = \eta_0(1 - \varphi/\varphi_m)^{-\nu\varphi_m}, \quad (1)$$

где η_0 – вязкость базовой жидкости, φ – объёмная доля частиц в дисперсионной системе

Атомы металлов, входящие в состав асфальтенов, могут придать молекуле полярность. Это приводит к тому, что в сырой нефти в нормальных условиях центры соседних молекул асфальтенов притягиваются друг к другу, тогда как внешние цепи отталкиваются цепями других молекул [5], а при приложении электрического поля очевидны смещение электронной плотности частиц и их поляризация. Вектор поляризации p , коллинеарный векторам электрического поля E и движения потока, приводит к возникновению силы притяжения между частицами $F=6p^2 n^{4/3}/\epsilon_f$. При

сопротивлении среды $F_{mp} = 6\pi\eta_0 V$, средняя скорость частиц составит $V = p^2 n^{4/3} / (\pi\eta_0 a \varepsilon_f)$. Величина поляризации p определяется по формуле:

$$\vec{p} = \varepsilon_f \vec{E} a^3 (\varepsilon_p - \varepsilon_f) / (\varepsilon_p + 2\varepsilon_f) \quad (2)$$

Время, через которое частицы встретятся, будучи движимы силой дипольного притяжения, получается при делении расстояния между частицами на их скорость сближения:

$$\tau = n^{-1/3} V^{-1} = \frac{\pi\eta_0 \left(\frac{4\pi}{3}\varphi\right)^{5/3} (\varepsilon_p - \varepsilon_f)^2}{\varepsilon_f (\varepsilon_p + 2\varepsilon_f)^2 E^2} \quad (3)$$

По формуле (3) с использованием выше приведенных параметров модели, построена зависимость времени сближения частиц от напряженности электрического поля (рисунок 1) для суспензии асфальтена в газолине при объёмных долях частиц 10% и 50%. Поскольку в более концентрированной суспензии расстояние между частицами меньше, скорость агрегации и образования цепочек при увеличении концентрации в 5 раз увеличивается примерно на порядок.

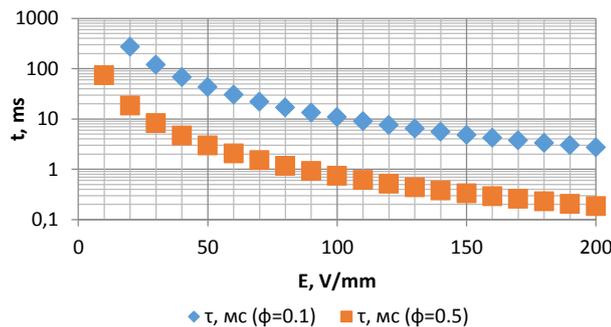


Рисунок 1. Зависимость времени агрегации от приложенного электрического поля

Благодаря высокой способности молекул асфальтена к образованию молекулярных агрегатов [6], за время τ дисперсионная система сферических частиц превращается в систему сонаправленных молекулярных цепочек, и, соответственно, в уравнении (1) для вязкости взвеси при времени обработки $t > \tau$ величина предельной объёмной доли частиц φ_m теперь меняет значение $\varphi_{сфера} = 0,64$ на значение $\varphi_{эллипс} = 0,72$, величина собственной вязкости частиц изменяется с $v_{||}(0) = v_{\perp}(0) = 2,5$ на $v_{||}(e) = 2,01$ для продольной вязкости и $v_{\perp}(0,9) = 4,485$ для поперечной вязкости (таблица 1). Таким образом, после подстановки этих величин в (1) справедливо условие (4), связывающее вязкость и время обработки электрическим полем. Время агрегации в свою очередь определяется приложенным электрическим полем (3).

$$\eta = \eta_0 \begin{cases} (1 - 1,56\varphi)^{-1,60}, & t < \tau \text{ (анизотропно)} \\ (1 - 1,35\varphi)^{-1,49}, & t \geq \tau \text{ (продольно)} \\ (1 - 1,35\varphi)^{-3,32}, & t \geq \tau \text{ (поперечно)} \end{cases} \quad (4)$$

При импульсной обработке условной сырой нефти импульсным электрическим полем с напряженностью 100 В/мм с длительностью импульса 10 мс в предположении образования цепочек из 10 и более молекул, изменение вязкости в продольном и поперечном направлениях составит -5,2% и +23,5% соответственно. Для более тяжелой и вязкой нефти, например, при объёмной доле частиц асфальтена 50%, при наложении $E=100$ В/мм всего на 1 мс соответствующее изменение вязкости составит -51% и +304%. Подавление движения частиц в поперечном направлении и его облегчение в продольном есть ничто иное, как подавление турбулентности и установление ламинарного режима течения при пониженной вязкости. Таким образом показано, что электрическое поле благоприятно скажется на энергоэффективности транспортировки нефти в нефтепроводах.

Список использованных источников:

1. Husain Al-Muslimi and Ibrahim Dincer, "Thermodynamic analysis of crude oil distillation systems" *International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res.* 2005; 29:637–655.
2. Tao, Rongjia & Gu, G. (2015). Suppressing turbulence and enhancing liquid suspension flow in pipelines with electrorheology. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics.* 91. 012304. 10.1103/PhysRevE.91.012304.
3. Сафиева Р.З. Химия нефти и газа. Нефтяные дисперсные системы: состав и свойства (часть 1): Учебное пособие / Р.З. Сафиева. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 112 с.
4. G. B. Jeffery, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 102, 161 (1922).
5. Акбарзаде К. Асфальтены: проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / Камран Акбарзаде // Schlumberger. – Режим доступа: <http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/2007/summer/3%20Asph%20altenes.pdf>.
6. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Комплект учебных пособий по программе магистерской подготовки «Нефтегазовые нанотехнологии для разработки и эксплуатации месторождений». Часть 5. ПРИРОДНЫЕ НАНООБЪЕКТЫ В НЕФТЕГАЗОВЫХ СРЕДАХ: Учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. – 104 с.