

Г. Х. Камалеева, Е. К. Вачагина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ

*Ключевые слова: высокопарафинистая нефть, неньютоновская жидкость, скорость сдвига, динамическая вязкость, напряжение сдвига.*

*В данной статье представлены результаты исследования реологического поведения высокопарафинистой нефти, экспериментальные результаты измерения динамической вязкости в заданных пределах изменения температуры.*

*Keywords: high(ly)-paraffinaceous oil, non-Newtonian liquid, shearing rate, dynamic viscosity, shear stress.*

*This article presents the research results of the rheological behavior of high paraffinaceous oil, the results of measurement of the dynamic viscosity in the given range of temperature.*

### Введение

Постоянное увеличение в общем объеме добываемой нефти доли высокопарафинистой нефти, застывающей при положительных температурах, ставит перед нефтяниками ряд сложнейших проблем. Высокопарафинистые нефти при низких температурах проявляют резко выраженные неньютоновские (вязко-пластичные, вязкоупругие, тиксотропные) свойства [1], без учета которых организовать рациональную эксплуатацию скважин, сбор, подготовку и транспорт нефти невозможно. Проблема возникает уже на стадии извлечения нефти из скважины и особенно остро она ощущается в северных регионах по причине более суровых погодных условий. Наиболее остро она стоит при транспортировке нефти от месторождения высокопарафинистой нефти до магистрального трубопровода и зависит от природного состава нефти конкретного месторождения. В магистральном нефтепроводе нефть из различных месторождений усредняется.

При транспорте высокопарафинистой нефти происходит интенсивная парафинизация трубопроводов, снижение их пропускной способности, что значительно усложняет их эксплуатацию и ведет к росту энергетических и материальных затрат. В случае остановки процесса перекачки в нефти образуются парафиновые структуры, прочность которых зависит от содержания парафиновых фракций, времени покоя нефти, условий образования парафиновых структур и других факторов. Возобновление процесса перекачки требует иногда создания таких пусковых давлений, которые по величине значительно превышают рабочие давления трубопроводов, арматуры и оборудования [4].

Трудности, возникающие при транспорте высокопарафинистой нефти, связаны с наличием в ее составе твердых кристаллов парафина при низких температурах. Температура плавления парафина находится в пределах 27 – 70° С. При более высоких температурах кристаллы растворяются в нефти и нефтепродуктах. По мере охлаждения нефти парафин выпадает в виде мелких игольчатых кристаллов, которые перепутываются между собой и поддерживают друг друга. С понижением

температуры количество кристаллов увеличивается настолько, что они образуют пространственную решетку по всему объему нефти, иммобилизующую жидкую фазу. В зависимости от состава нефти и скорости охлаждения количество и размеры кристалликов парафина будут разными [5]. Чем больше в нефти парафина и асфальтосмолистых веществ, тем прочнее пространственная решетка и выше вязкость.

Осаждение АСПО на рабочих поверхностях нефтепромыслового оборудования ведет к снижению пропускного диаметра трубопровода, увеличению давления перекачки в трубопроводе, повышенному износу перекачивающих насосов. Нефтедобывающие компании вынуждены останавливать добычу и проводить профилактические работы по удалению АСПО и внеплановые ремонтные работы, что, в конечном счете, ведет к снижению добычи за время простоя, удорожанию нефти. Для выяснения строения смол и фракций асфальтенов используется ИК спектроскопия [2,3].

Известны различные способы транспортировки высоkozастывающей нефти. Наиболее распространенным и надежным является способ горячей перекачки. Однако, печи путевого подогрева являются источником выброса вредных веществ, что ведет к увеличению платежей за загрязнение природной среды. Также не исключается возможность возникновения аварийных ситуаций, что может привести к экологическим и техническим проблемам. Поэтому исследование реологических свойств высокопарафинистой нефти является актуальной задачей.

### Экспериментальная часть

Исследовалась высокопарафинистая нефть Маmurинского месторождения скважины № 7, плотность нефти при 20° С  $\rho_{20} = 0,8790 \text{ г/см}^3$  и кинетическая вязкость  $\nu_{20} = 16,39 \text{ сСт}$ .

Было проведено исследование зависимости динамической вязкости от  $\gamma$ -скорости сдвига при различных фиксированных значениях температуры. Динамическая вязкость измерялась на вискозиметре

при температуре от  $16,5^{\circ}\text{C}$ , соответствующей комнатной, до  $47,5^{\circ}\text{C}$ .

Зависимость динамической вязкости от температуры и исследование реологического поведения нефти были проведены с помощью ротационного вискозиметра RM 100 (фирма Rheology, Франция). Прибор осуществляет решение всего спектра задач, связанных с контролем реологического поведения жидкости, построения реологических кривых и проведение их анализа. Является наиболее универсальным вариантом вискозиметра, работающего в соответствии с требованиями стандартов ASTM/ISO 2555 (ГОСТ 25271), DIN/ISO 3219, ГОСТ 29226, ГОСТ 52249 (GMP). Оснащен встроенным термодатчиком, таймером, данные выводятся на ЖК- дисплей.

### Результаты и их обсуждение

После обработки экспериментальных данных были получены зависимости динамической вязкости от скорости сдвига при различных значениях температуры. Неньютоновский характер поведения нефти обуславливается наличием в ней распределенных частиц парафина. Для описания реологического поведения нефти использовалось степенное уравнение.

На рис. 1 представлены результаты экспериментальных измерений напряжения сдвига в зависимости от скорости сдвига.

Как видно из расположения кривых, при  $t > 316^{\circ}$  поведение исследуемой жидкости становится близким к ньютоновскому, а разность между восходящими и нисходящими ветвями для  $t < 316^{\circ}$  свидетельствует о тиксотропных свойствах жидкости.

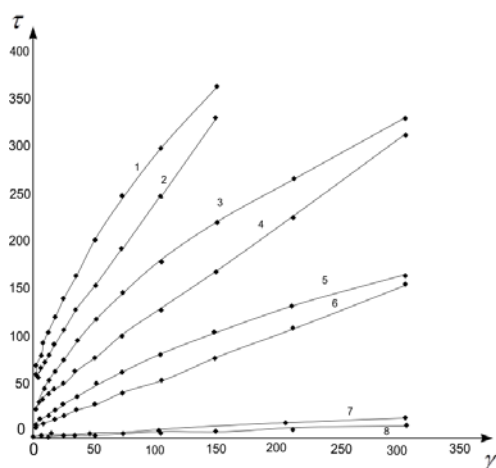


Рис. 1 - Экспериментальные графики зависимостей напряжения сдвига от скорости сдвига для различных температур: кривые 1 и 2 - при температуре  $23,2^{\circ}\text{C}$  восходящие и нисходящие кривые, соответственно; 3 и 4 - при температуре  $25,3^{\circ}\text{C}$ ; 5 и 6 - при температуре  $28,2^{\circ}\text{C}$ ; 7 и 8 - при температуре  $31,6^{\circ}\text{C}$ ; 9 и 10 - при температуре  $39^{\circ}\text{C}$

### Обработка результатов вискозиметрических экспериментов для высокопарафинистой нефти

Будем считать, что зависимость вязкости  $\mu$  от скорости сдвига  $\gamma$  и температуры  $T$  может быть представлена в виде

$$\mu = k_0 \gamma^n \exp\left(\frac{B}{RT}\right),$$

где  $k_0, n$  - реологические константы  $B$  - энергия активации вязкого течения;  $R = 8314$  Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная. Полагаем

$$k = k_0 \exp\left(\frac{B}{RT_0}\right), \text{ тогда получим}$$

$$\mu = k \gamma^n \exp\left(\frac{B(T_0 - T)}{RTT_0}\right); \quad (1)$$

$T_0$  - некоторая температура (в нашем случае выберем  $T_0 = 293\text{K}$ ).

Коэффициент  $k$  определяет консистенцию при температуре  $T_0$ .

Прологарифмируем выражение (1)

$$\ln \mu = \ln k + n \ln \gamma + \frac{B(T_0 - T)}{RTT_0} \quad (2)$$

и введем следующие обозначения

$$z = \ln \mu; A = \ln k; x = \ln \gamma; y = \frac{(T_0 - T)}{RTT_0}. \quad (3)$$

Тогда (3) можно записать как

$$z = A + nx + By \quad (4)$$

В результате эксперимента были получены ряд значений вязкости  $\mu_{ij}$  при различных значениях  $\gamma_i$  и  $T_j$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$ . По этим данным определим соответствующие величины  $z_{ij} = \ln \mu_{ij}$ ,  $x_i = \ln \gamma_i$ ,  $y_j = \frac{(T_0 - T_j)}{RT_j T_0}$ .

Для определения неизвестных коэффициентов  $A, n, B$  применим метод наименьших квадратов и составим функцию  $F(A, n, B)$ .

$$F(A, n, B) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j)^2 \quad (5)$$

Найдем неизвестные  $A, n, B$  из условия минимума функции  $F(A, n, B)$ . Для этого найдем частные производные функции  $F(A, n, B)$

$$\frac{\partial F(A, n, B)}{\partial A} = -2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j); \quad (6)$$

$$\frac{\partial F(A, n, B)}{\partial n} = -2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j) x_i; \quad (7)$$

$$\frac{\partial F(A, n, B)}{\partial B} = -2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j) y_j; \quad (8)$$

Точку локального минимума функции  $F(A, nB)$  найдем из условий равенства нулю частных производных функции  $F(A, nB)$ , получим

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j) = 0 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j) x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (z_{ij} - A - nx_i - By_j) y_j = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Преобразуем (9) к виду

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M z_{ij} - A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M 1 - n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_i - B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_j = 0 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M z_{ij} x_i - A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_i - n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_i)^2 - B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_j x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M z_{ij} y_j - A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_j - n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_i y_j - B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_j)^2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Будем рассматривать (10) как систему трех уравнений с тремя неизвестными, решаемую методом Крамера. В результате получим следующие значения параметров модели для прямой последовательности испытаний

1)  $k = 35.339$ ;  $n = -0.35$ ;  $B = 1.817 \cdot 10^8$ ;

для обратной последовательности испытаний

2)  $k = 32.23$ ;  $n = -0.413$ ;  $B = 1.734 \cdot 10^8$ ;

среднеквадратичная погрешность составляет  $\delta = 0.109$

На графике рис.2. представлены экспериментальные точки и аппроксимирующая зависимость для восходящей и нисходящей зависимостей  $\mu(\gamma, T)$ .

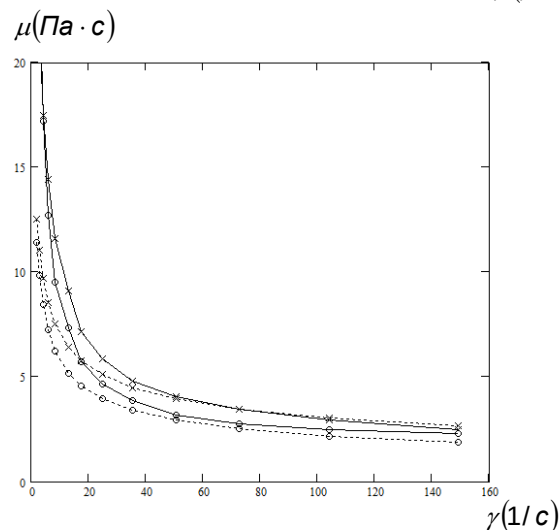


Рис. 2 - Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига при  $T = 23^\circ\text{C}$

Экспериментальные точки:  $\times$  - восходящая зависимость;  $\circ$  - нисходящая зависимость; теоретические результаты: сплошная линия - восходящая зависимость; пунктирная линия - нисходящая зависимость.

$$\mu = 35,339\gamma^{-0,35} \exp\left(\frac{1817 \cdot 10^8 (T_0 - T)}{RTT_0}\right)$$

$$\mu = 32,23\gamma^{-0,413} \exp\left(\frac{1734 \cdot 10^8 (T_0 - T)}{RTT_0}\right)$$

## Заключение

Исследована зависимость динамической вязкости образца высокопарафинистой нефти от  $\gamma$ -скорости сдвига и температуры. Получена реологическая модель ее поведения с использованием степенного закона. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и расчетах транспортировки нефти.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Академии наук РТ (грант № 12-08-97034-р\_поволжье\_a).

## Литература

1. Мухаметзянов И.З. Структурная организация макромолекулярных ассоциатов в нефтяных сферах / Мухамезянов. И.З. М.: Наука, 2003. 156 с.
2. Егоров А.В., Николаев В.Ф., Султанова Р.Б. Упрощенный метод «холодного стержня» для оценки ингибирующего действия реагентов, применяемых при профилактике и удалении парафиноотложений с металлических поверхностей при добыче и транспорте нефти / Вестник КГТУ.-2012.-№8. 295-299 с.
3. Петрова Л.М. Устойчивость нефтей к выпадению асфальтенов. Салимова Л.И. и др. // Вестник КГТУ.-2010.-№9. 579-583 с.
4. Тетельмин В.В., Язев В.А. Магистральные нефтегазопроводы. Учебное пособие / Тетельмин В.В., Язев В.А.. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
5. Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртулов В.Г. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров. Учебное пособие / Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртулов В.Г. М.: Химия, 1996. 432 с.