

## ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР

## ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТИ

В.А. Шакиров

Научный руководитель - доцент В.М. Галкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Любое физико-химическое свойство нефти есть результат проявления состава и структуры этой нефти. Вязкость – одно из важнейших реологических свойств нефти, которое необходимо для определения подвижности нефти в пласте. Сведения о вязкости учитываются при подборе типа вытесняющего агента, подсчете мощности насосов, определении скорости фильтрации жидкости в пласте, расчете технологических схем трубопроводов при транспортировке нефти и нефтепродуктов. По величине вязкости нефти можно дать приближенную оценку её состава. Знание вязкости нефти необходимо для качественной разработки залежи, так как именно величина извлекаемой жидкости оказывает влияние на основные показатели разработки нефтяных залежей. Показатель вязкости нефти учитывается при расчете объема воды, необходимого для закачки в пласт с целью вытеснения нефти к скважине. При эксплуатации месторождения с нефтью малой вязкости конечная нефтеотдача достигается при меньших объемах прокаченной воды по сравнению с месторождениями, где вязкость выше. В динамике отборов воды и нефти из пласта показатель вязкости является определяющим при стремлении достижения безводной нефтеотдачи. При подборе насосного подземного оборудования учитывается изменение вязкости жидкости, которое влияет на возникающее в трубах гидравлическое сопротивление. При перекачке высоковязкой нефти уменьшается коэффициент полезного действия насосов и снижается напор. При неправильном определении вязкости извлекаемого флюида снижается период безремонтной работы насоса из-за его перегрева. В расчете технологии транспортировки нефти также необходимо учитывать изменение вязкости транспортируемой нефти. Перекачка маловязкой нефти обычно осуществляется в температурных условиях окружающей среды без предварительной обработки в отличие от высоковязкой нефти, которую механически, химически и термически обрабатывают. Таким образом, одной из важнейших задач реологии нефти и нефтепродуктов является определение вязкости нефти, определение напряжения сдвига в зависимости от скорости сдвига и температуры.

Согласно работе [4] нефть и продукты её переработки можно рассматривать не как молекулярные растворы, а как дисперсные системы – суспензии, состоящие из дисперсионной среды и дисперсной фазы. Последняя представлена частицами, состоящими из ядер и сольватных оболочек. Ядра состоят из молекул с высокими значениями С/Н. В работе [1] экспериментально установлено, что от температуры и сдвиговых деформаций зависит разрушение сольватного слоя и, как следствие, изменение размера дисперсных частиц. Далее считаем температуру постоянной, тогда радиус частиц максимальный при нулевой скорости деформации, а минимальный при максимальной скорости деформации.

В статье [2] нефтяная дисперсная система характеризуется как ньютоновская дисперсионная среда, а неньютоновские свойства объясняются изменением размеров монодисперсных частиц дисперсной фазы (концентрация которой мала) в процессе сдвиговых деформаций. В этом случае можно использовать формулу Эйнштейна, в которой вязкость суспензии линейно зависит от объемной концентрации частиц. Предполагая, что сдвиговая деформация вызывает незначительное изменение радиуса частиц, в работе [2] получена аналитическая формула для определения зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига.

Обозначим экспериментальные данные  $\{(\epsilon_i, \tau_i)\}_{i=1}^N$ , где  $\epsilon_i$  – множество значений скоростей сдвига,  $\tau_i$  – соответствующие им напряжения сдвига,  $N$  – количество данных. Аппроксимирующую зависимость из [2]

$$\tau = \tau_0 + \eta_0 \epsilon + \eta_0 10\pi n \left( \frac{\epsilon}{3} + \frac{1}{k} \left( \frac{a_0}{a_\infty} - 1 \right) \right) [1 - \exp(-k\epsilon)] (a_\infty^3 + 3a_\infty^2(a_0 - a_\infty) \exp(-k\epsilon)) \quad (1)$$

обозначим  $\tau(\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty, \epsilon)$ , где  $a_0$  и  $a_\infty$  – соответственно радиусы частиц при скорости сдвига  $\epsilon = 0$  и  $\epsilon = \infty$ ;  $k$  – константа;  $\eta_0$  – динамическая вязкость дисперсионной среды;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига;  $n$  – число дисперсных частиц (в работе [3] указано, что в нефтях  $n \approx 1,75 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ). Тогда искомые значения  $\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty$  находятся с использованием метода наименьших квадратов из решения следующей задачи:

$$\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty = \operatorname{argmin} S(\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty), \quad (2)$$

$$\text{где} \\ S(\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty) = \sum_{i=1}^N (\tau(\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty, \epsilon_i) - \tau_i)^2. \quad (3)$$

В работе [2] решение нелинейной задачи (2) было получено численно с использованием модифицированного метода Ньютона. Однако проведенные нами расчеты в Excel с использованием Solver, в котором реализован метод Ньютона, показали, что полученное решение не единственное и зависит от начального приближения.

В данной работе предложен комбинированный подход, в котором задача (2) сводилась к поиску минимума функции (3) в пространстве не пяти параметров  $\tau_0, \eta_0, a_0, k, a_\infty$ , а только двух. При этом на первом шаге строился зависящий от двух параметров график функции (3). Из визуального анализа линий уровня выбирались такие значения параметров, которые лежали около физических приемлемого минимума. На заключительном шаге эти значения использовались как начальные в Excel и Solver для поиска минимума в пространстве двух параметров.

Уменьшение числа неизвестных с пяти до двух производилось следующим образом. Аппроксимирующая зависимость (1) была преобразована к эквивалентному виду

$$\tau(\tau_0, \eta_0, y, k, b, \epsilon) = \tau_0 + \eta_0 \epsilon + yg(k, b, \epsilon), \quad (4)$$

$$\text{где } g(k, b, \epsilon) = \left( \frac{\epsilon}{3} + \frac{b}{k} [1 - \exp(-k\epsilon)] \right) (1 + 3b \exp(-k\epsilon)). \text{ Здесь } y = \eta_0 a_3, b = a_0/a_\infty - 1; a_3 = 10\pi n a_\infty^3.$$

Тогда соотношение (3) с учетом (4) примет вид

$$S(\tau_0, \eta_0, y, k, b) = \sum_{i=1}^N (\tau_0 + \eta_0 e_i + yg(k, b, e_i) - \tau_i)^2. \quad (5)$$

Необходимым условием минимума функции является равенство нулю частных производных этой функции по всем её аргументам. Поэтому из соотношений  $\frac{\partial S}{\partial \tau_0} = 0$ ,  $\frac{\partial S}{\partial \eta_0} = 0$ ,  $\frac{\partial S}{\partial y} = 0$  с учетом того, что  $\frac{\partial g}{\partial \tau_0} = \frac{\partial g}{\partial \eta_0} = \frac{\partial g}{\partial y} = 0$  получается линейная система трех уравнений с тремя неизвестными, из которой легко находятся  $\tau_0, \eta_0, y$ , зависящие от  $k, b$ . Следовательно, теперь функция (5) будет зависеть только от двух аргументов  $k$  и  $b$ :

$$S(k, b) = \sum_{i=1}^N (\tau_0(k, b) + \eta_0(k, b) e_i + y(k, b) g(k, b, e_i) - \tau_i)^2. \quad (6)$$

На основе полученных соотношений выполнены расчеты с использованием следующих экспериментальных данных:  
 $\{e_i\} = \{3; 5,4; 9; 16,2; 27; 48,6; 81; 145,8; 243; 437,4; 729; 1312\}$ ,  
 $\{\tau_i\} = \{2,16; 2,21; 2,48; 2,9; 3,69; 4,95; 6,48; 8,96; 12,02; 18,18; 25,35; 43,06\}$ . На рисунке показана функция (6) при  $k \in [10^{-4}; 1]$ ,  $b \in [10^{-3}; 12]$ . По каждому измерению было 250 равноотстоящих точек. Рисунок построен в программе Surfer с использованием градиентной заливки, метод интерполяции – крайгинг.

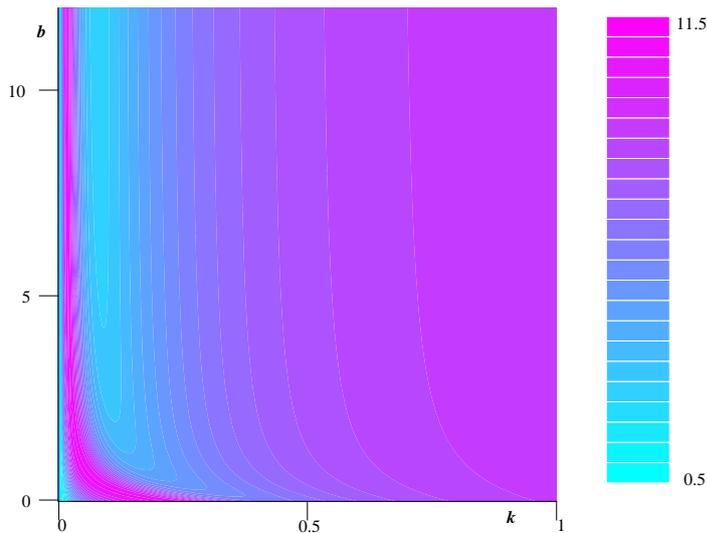


Рис. Функция  $S(k, b)$

Из рисунка следует, что на некотором расстоянии от левой границы сверху вниз идут максимальные значения. Следовательно, функция (6) не обладает унимодальностью, что и объясняет неединственность решения методом Ньютона. С рисунка можно взять начальные данные слева и справа от максимумов для поиска минимума функции (6), с последующей проверкой на физическую достоверность результата, в частности, полученные значения  $\tau_0, \eta_0, y, k, b$  должны быть больше нуля.

Таким образом, предложенный подход позволяет для экспериментальных данных найти параметры аппроксимирующего соотношения и определить зависимость напряжения сдвига и/или вязкости от скорости сдвига.

Благодарим Л.В. Шишмину за привлечение внимания к проблеме и Л.В. Чеканцеву за предоставленные экспериментальные данные.

#### Литература

1. Абдульманов Р.Г., Сериков П.Ю., Смидов Е.В., Сюняев З.И. Агрегативная. Устойчивость тяжелого дистиллятного сырья в присутствии активирующих добавок // Химия и технология топлива и масел. – 1985. – №1. – 28 – 29 с.
2. Гиниятуллин В.М., Теляшев Э.Г., Урманчеев С.Ф. К вопросу о механизме изменения вязкости нефтяных дисперсных систем // Учебное пособие. Нефтепереработка и нефтехимия. – 1997. – №8. – 18–20 с.
3. Гилязетдинов Л.П., Аль-Джомо А. Определение параметров темных частиц дисперсной фазы в нефтяных системах // Химия и технологии топлив и масел. – 1994. – №3. – 27 – 29 с.
4. Сюнев З.И. Нефтяной углерод. – М.: Химия, 1980 – 270 с.

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН ОТ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПРОБОК

Е.А. Шефер

Научный руководитель старший преподаватель Ю.А. Максимова

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

На данный момент Российская экономика сильно зависима от нефтегазовой отрасли. Для того, чтобы наша страна благополучно процветала и развивалась, ей нужны большие денежные средства. Огромная доля финансирования поступает как раз от нефтегазовой промышленности. Это говорит о том, что нашему государству выгодно развиваться в этой области. В процессе разработки возникает множество проблем, таких как падение темпов извлечения и износ оборудования. Чтобы решить эти проблемы нужно развивать технологии повышения извлечения нефти и газа, а также усовершенствовать методы добычи горючих ископаемых.

В данной статье речь пойдет о технологиях и технических средствах для очистки газовых скважин от песчано-глинистых пробок. В процессе эксплуатации газовых скважин, особенно в период снижения темпов добычи газа, часты случаи образования пробок на забое скважины. Процесс пробкообразования наиболее часто наблюдается на месторождениях, продуктивные горизонты которых образованы песчано-глинистыми горными породами и слабосцементированными песчаниками.