

Оценка реологических свойств бивязких жидкостей по данным ротационной вискозиметрии

М.А. Мыслюк, Ю.М. Салыжин
(Ивано-Франковский национальный
технический университет нефти и газа)

The evaluation of biviscosity fluids rheological properties on the basis of rotational viscometry data

M.A. Myslyuk, Yu.M. Salzhyn
(Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas)

Эффективность использования гидравлических программ бурения и цементирования скважин во многом определяется наличием объективной информации о реологических свойствах буровых и тампонажных растворов, а также о влиянии на них условий скважины (температура, давление и др.). Это является необходимым условием для адекватного моделирования реодинамических процессов при бурении скважин с целью принятия научно обоснованных технологических решений [1, 2].

В современных гидравлических программах [1, 3-5] используется, как правило, информация о реологических свойствах для одной и той же реологической модели бурового или тампонажного раствора (Шведова – Бингама, Оствальда, Гершеля – Балкли и других). Более совершенные гидравлические программы бурения [2] и цементирования [6] скважин предусматривают выбор адекватной реологической модели в некотором их классе. Разработана методика обработки данных ротационной вискозиметрии [7-9], позволяющая обосновать выбор адекватной реологической модели, в том числе учитывающая баротермические условия скважины.

Другим возможным направлением повышения эффективности гидравлических программ является применение более сложных реологических моделей, в частности, с увеличенным числом реологических параметров (Гершеля – Балкли, Шульмана – Кессона, Шульмана, универсальной реологической модели [10] и др.). Для буровых и тампонажных растворов, которые относятся к дисперсным системам, представляет интерес использование бивязких реологических моделей вида

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \dot{\gamma}(\tau, a^{(1)}), & \tau \leq \tau^*, \\ \dot{\gamma}(\tau, a^{(2)}), & \tau > \tau^*, \end{cases} \quad (1)$$

где $a^{(1)}, a^{(2)}$ – реологические свойства моделей соответственно для низких и высоких градиентов скоростей сдвига $\dot{\gamma}$; τ – напряжение сдвига; τ^* – граничное напряжение сдвига, определяемое по уравнению $\dot{\gamma}(\tau^*, a^{(1)}) = \dot{\gamma}(\tau^*, a^{(2)})$.

Термин «бивязкая жидкость» обычно используется для аппроксимации реологической кривой моделями вязкой ($\tau \leq \tau^*$) и вязкопластической ($\tau > \tau^*$) жидкостей (А. Надаи, 1969 г.). При этом вторая часть реологического уравнения при $\tau > \tau^*$ описывает по существу вязкое течение жидкости. Уравнение (1)

The procedure of rotational viscometry data processing has been described, considering biviscosity rheological models. Data processing examples have been presented.

часто применяют для моделирования течений линейных и нелинейных вязкопластических жидкостей: для низких скоростей сдвига используется модель Ньютона с вязкостью $\eta \rightarrow \infty$ [11-13].

Следуя работе [9], термин «бивязкая жидкость» в более широком понимании будем трактовать как совокупность произвольных комбинаций реологических моделей вида $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau, a)$. При этом предпочтение отдается однопараметрическим (Ньютона) и двухпараметрическим (Шведова – Бингама, Оствальда де Ваала) реологическим моделям. Например, в пакете программ HydraGram™ в соответствии с рекомендациями API RP 13D оцениваются реологические свойства для бивязкой степенной модели [14]. С учетом изложенного бивязкая модель вида (1) существенно расширяет класс Φ реологически стационарных моделей в плане кусочной аппроксимации данных измерений, что в определенных условиях позволяет адекватнее описывать ламинарные течения жидкостей.

Для оценки реологических свойств бивязких жидкостей воспользуемся методикой [7-9], основанной на уравнении течения Куэтта в узком зазоре между коаксиальными цилиндрами

$$\omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_n}^{\tau_b} \frac{\dot{\gamma}(\xi)}{\xi} d\xi, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения наружного цилиндра; τ_b, τ_n – напряжения сдвига соответственно на внутреннем и наружном цилиндрах.

Таблица 1

Жидкость	Реологическая модель $\dot{\gamma}$	Реологические свойства						τ^* , Па	Дисперсия σ_v^2 , Па ²
		k_1 , Па·с ⁿ	n_1	τ_{02} , Па	η_2 , Па·с	k_2 , Па·с ⁿ	n_2		
Буровой раствор (скв. 103 Веснянская, отобран 17.04.03 г.)	Бивязкая Оствальда и Оствальда	10,094	0,4275	—	—	0,4342	0,6126	9,84	0,0485
Водный раствор биополимера Duo-vis (0,5 %)	Бивязкая Оствальда и Оствальда	4,522	0,1698	—	—	2,243	0,3105	11,18	0,0224
Гуматно-биополимерный буровой раствор (Duo-vis — 0,5 %, ПУЦР — 6 %)	Бивязкая Оствальда и Оствальда	13,84	0,1273	—	—	10,09	0,1948	26,6	0,0497
Буровой раствор (глина — 10 %, КМЦ — 0,1 %; [15])	Бивязкая Оствальда и Шведова-Бингама	0,5764	0,4963	4,496	0,0136	—	—	6,158	0,1408
Тампонажный раствор (ПЦТ-1-50 : ВПМС = 94 : 6, водоцементное отношение — 0,6, время загустевания 60 мин)	Бивязкая Оствальда и Ньютона	1,468	0,4189	—	0,0379	—	—	21,82	0,9208

Примечание. k_1 , k_2 — мера консистенции соответственно первой и второй модели; n_1 , n_2 — показатель нелинейности соответственно первой и второй модели; τ_{02} — динамическое напряжение сдвига второй модели; η_2 — пластическая вязкость второй модели.

Напряжение сдвига на наружном цилиндре

$$\tau_n = \begin{cases} \alpha^2 \tau_b, & \text{если } \tau_b \geq \tau_0 / \alpha^2, \\ \tau_0, & \text{если } \tau_b = [\tau_0, \tau_0 / \alpha^2], \end{cases} \quad (3)$$

где $\alpha = R_b / R_n$; R_b , R_n — радиус соответственно внутреннего и наружного цилиндра; τ_0 — динамическое напряжение сдвига (предел текучести) жидкости.

Методика [7 – 9] построена на решении уравнения (2) с учетом информационной содержательности опытов в классе Θ реологически стационарных моделей, допускающих явное аналитическое представление вида $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$. Особенность ее использования для бивязких жидкостей состоит в нахождении параметра τ^* и построении решения прямой задачи $A(\omega, a^v)$ при $\tau_n < \tau^* < \tau_b$.

Поиск граничного напряжения сдвига для заданных реологических моделей бивязких жидкостей может быть формализован в виде расширения класса Θ реологически стационарных моделей [9]. Для этого используются различные комбинации разделения результатов измерений на группы $\{\tau_1, \dots, \tau_L\}$ и $\{\tau_{L+1}, \dots, \tau_N\}$ с учетом ограничений

$$L \geq r^{(1)} + 1, N - L \geq r^{(2)} + 1, \tau_L \leq \tau^* \leq \tau_{L+1}, \quad (4)$$

где $r^{(1)}$, $r^{(2)}$ — число оцениваемых параметров a в реологических моделях соответственно $\dot{\gamma}(\tau, a^{(1)})$ и $\dot{\gamma}(\tau, a^{(2)})$.

Если для некоторой группы измерений одно из ограничений (4) не выполняется, то она исключается из класса Θ . Тогда обработка данных ротационной вискозиметрии сводится к формированию класса Θ реологических моделей (в том числе бивязких), выборе наиболее адекватной реологической модели v^* и оценке ее свойств \hat{a}^v . Для этого используют решающие правила из условия максимума функции правдоподобия, что эквивалентно [7]

$$\min \|C^{-1/2}(\tau - A(\omega, a^v))\| \Rightarrow (\hat{a}^v, v^*), v \in \Theta, \quad (5)$$

где C — матрица ковариаций случайной компоненты; $\tau = \{\tau_i\}$, $\omega = \{\omega_i\}$, $i = \overline{1, N}$ — данные измерений соответственно напряжений сдвига и частоты вращения наружного цилиндра.

Для реализации методики создан программный пакет «Реометрия 2» [8, 9], в котором класс Θ моделей формируется в интерактивном режиме и представлен моделями Ньютона, Оствальда, Шведова – Бингама, Гершеля – Балкли и Шульмана – Кессона, а также произвольными сочетаниями бивязких моделей. Решение задачи (5) может быть получено в предположении, что случайная компонента во всех точках измерений является стационарной некоррелированной, нестационарной некоррелированной и нестационарной коррелированной.

В качестве примера рассмотрим результаты обработки некоторых данных ротационной вискозиметрии с учетом бивязких реологических моделей для матрицы ковариаций вида $S = \sigma_v^2 I$ (σ_v^2 — дисперсия стационарной некоррелированной случайной компоненты; I — единичная матрица). Класс Θ моделей сформирован из указанных выше двух- и трехпараметрических реологических моделей, а также из произвольных сочетаний бивязких моделей.

В табл. 1 приведены результаты обработки данных ротационной вискозиметрии, для которых наиболее адекватной является бивязкая реологическая модель. Анализ результатов обработки данных для буровых и тампонажных растворов показывает, что бивязкие реологические модели нередко являются наиболее адекватными относительно критерия (5), причем для тампонажных растворов бивязкие модели чаще адекватны данным измерений.

На рис. 1 и 2 представлены исходные данные для тампонажного раствора с добавками высокопрочных микросфер (ВПМС) и результаты их обработки с помощью пакета программ «Реометрия 2». В табл. 2 приведена в порядке возрастания дисперсия адекватности σ_v^2 для всех Θ реологических моделей тампонажного раствора.

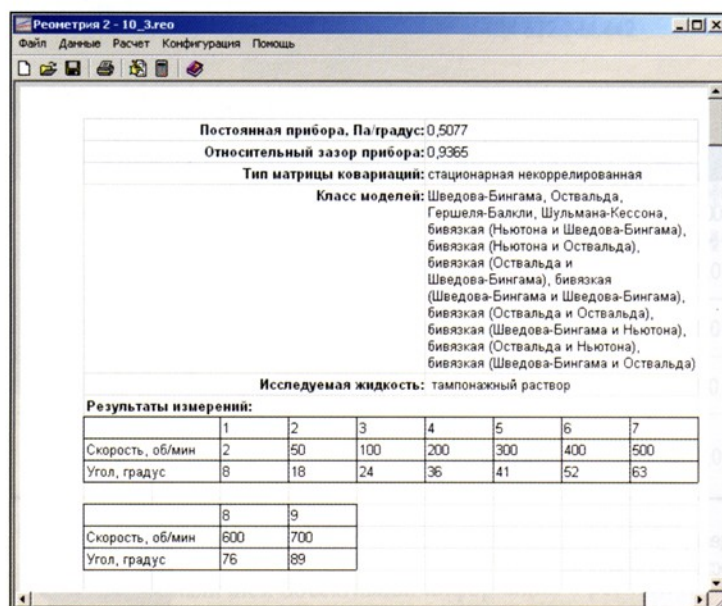


Рис. 1. Исходные данные для тампонажного раствора с добавками ВПМС

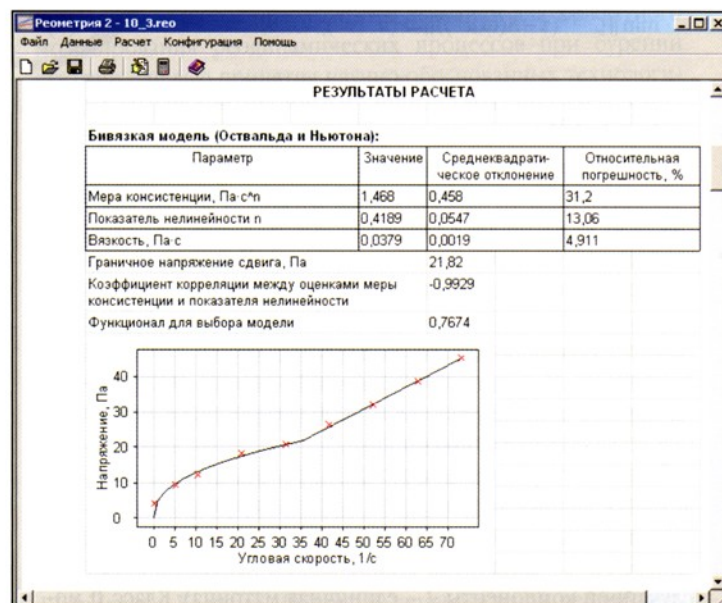


Рис. 2. Результаты обработки для тампонажного раствора с добавками ВПМС

Таблица 2

Реологическая модель	Дисперсия σ^2 , Па ²
Бивязка Оствальда и Ньютона	0,9208
Бивязка Оствальда и Шведова – Бингама	1,118
Бивязка Оствальда и Оствальда	1,126
Шведова – Бингама	1,795
Шульмана – Кессона	2,009
Гершеля – Балкли	2,095
Оствальда	5,958
Бивязка Шведова – Бингама и Шведова – Бингама	∞^*
Бивязка Ньютона и Шведова – Бингама	∞
Бивязка Ньютона и Оствальда	∞
Бивязка Шведова – Бингама и Оствальда	∞

Примечание. Данные ротационной вискозиметрии не описываются реологической моделью.

Таким образом, использование методики обработки данных ротационной вискозиметрии с учетом бивязных реологических моделей позволяет более адекватно описывать ламинарные течения буровых и тампонажных растворов. Это открывает новые возможности в изучении реодинамики технологических процессов бурения скважин. Для повышения точности оценок реологических свойств бивязных буровых растворов необходимо применять многоскоростные ротационные приборы.

Список литературы

1. Бабаян Э.В., Громовой Э.А., Шурыгин М.Н. Новая реолого-гидравлическая программа углубления скважин // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 1. – С. 39-40.
2. Совершенствование технологии отработки трехшарошечных долот при роторном бурении скважин / М.А. Мыслик, Р.И. Стефурак, И.И. Рыбич, Ю.М. Василюк. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2005. – 212 с.
3. Программные решения для бурения скважин в сложных условиях. <http://www.petec.ru/docs/drillbench-russian.pdf>.
4. Гидравлический расчет цементирования скважин. <http://vertlugi.ru/eq/prog/grcs.php>.
5. OptiCem™ Software. <http://www.halliburton.com/ps/Default.aspx?navid=184&pageid=496&prodid=PRN%3a%3aQSHB0BEB>.
6. Мыслик М.А., Рыбич И.И., Яремичук Р.С. Бурения свердлов: Довідник: У 5 т. Т.5.: Ускладнення. Аварії. Екологія. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 376 с.
7. Мыслик М.А. О методике определения реологических свойств дисперсных сред по данным ротационной вискозиметрии // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т.54. – № 6. – С. 975-979.
8. Мыслик М.А., Салихин Ю.М. Оценка влияния баротермических условий на реологические свойства буровых растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2007. – № 4. – С. 44-47.
9. Мыслик М.А., Салихин Ю.М. Ротаційна віскозиметрія: нові підходи до обробки даних // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 17-21.
10. Осипов П.Ф., Бурдуковский Р.В., Лахтионов С.В. Универсальная реологическая модель для буровых промысловых жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2007. – № 4. – С. 35-38.
11. Tanaka O., Shimazaki Y. Calculation of a time-dependent Bingham-type flow using marker FEM // Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications. – Lisse: Swets & Zeitlinger, 2001. – P. 315-319.
12. Елюхина И.В. Математическое моделирование и параметрическая идентификация процессов физико-химической гидродинамики в высокотемпературной вискозиметрии: Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. докт. физ.-мат. наук. – Челябинск, 2007.
13. Spelay R.B. Solids transport in laminar, open channel flow of non-newtonian slurries: Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan. – Saskatoon, 2007. – 422 p.
14. API RP 13D Recommended Practice on the Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids / 4th Edition. – 2003. – May. – 35 p.
15. Миронова Е.В., Леонов Е.Г. Совершенствование методики выбора реологических моделей буровых растворов по данным экспериментальных исследований на ротационных вискозиметрах // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2002. – № 9. – С. 31-35.