

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БАРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

М.А. Мыслюк, Ю.М. Салыжин

(Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа)

Моделирование реодинамических процессов технологий бурения требует информации о влиянии баротермических условий скважины на реологические свойства бурового раствора. Эта информация весьма важна для принятия эффективных технологических решений, составляющих основу гидравлической программы промывки скважины [1—4].

Влияние баротермических условий скважины оценивается по данным измерений реологических свойств бурового раствора на ротационном вискозиметре для плана экспериментов с различными сочетаниями давления (p_1, p_2, \dots, p_k) и температуры (T_1, T_2, \dots, T_l) в требуемом диапазоне их изменения.

Рассмотрим особенность обработки данных ротационной вискозиметрии для построения уравнений состояния реологических свойств с помощью методики [5], теоретической основой которой является уравнение течения Куэтта в зазоре между коаксиальными цилиндрами

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

где ω — угловая скорость вращения наружного цилиндра;

τ, τ_n — напряжения сдвига на внутреннем и наружном цилиндрах;

$$\tau_n = \begin{cases} \alpha^2 \tau, & \text{если } \tau \geq \tau_0 / \alpha^2; \\ \tau_0, & \text{если } \tau = [\tau_0, \tau_0 / \alpha^2]; \end{cases}$$

$\alpha = R_n / R_{\text{н}}; R_n / R_{\text{н}}$ — радиусы внутреннего и наружного цилиндров;

τ_0 — динамическое напряжение сдвига (предел текучести) жидкости;

$\dot{\gamma}(\tau)$ — реологическая модель жидкости.

Методика [5] построена на строгом решении уравнения (1) в классе \mathfrak{D} реологически стационарных моделей, допускающих явное аналитическое представление вида $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$, с учетом информационной содержательности опытов. Выбор наиболее адекватной v^* реологической модели и оценка ее свойств \hat{a}^v осуществляются из условия максимума функции правдоподобия, что эквивалентно

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

где C — матрица ковариаций случайной компоненты;

$A(\omega, a^v)$ — оператор прямой задачи ротационной вискозиметрии;

$\tau = \{\tau_i\}, \omega = \{\omega_i\}, i = \overline{1, N}$ — векторы измерений напряжений сдвига и частот вращения наружного цилиндра. Решение задачи (2) может быть построено в предположении, что случайная компонента во всех точках измерений является стационарной некоррелированной, нестационарной некоррелированной и нестационарной коррелированной.

Для реализации методики создан пакет программ «Реометрия» [6], в котором класс \mathfrak{D} представлен моделями Ньютона, Оствальда, Шведова—Бингама, Гершеля—Балкли и Шульмана—Кессона.

Обработка данных для построения уравнений состояния $a^v(p, T)$ реологических свойств наиболее естественно для матрицы ковариаций вида $C = \sigma_v^2 I$, где σ_v^2 — дисперсия стационарной некоррелированной случайной компоненты, I — единичная матрица. При этом одним из важнейших требований является использование одной и той же реологической модели для всех значений давлений и температуры в плане эксперимента, что требует уточнения алгоритма решения задачи (2) в виде

$$\min_{a_{sq}^v} \| \tau - A(\omega, a_{sq}^v) \| \Rightarrow \hat{a}_{sq}^v, \quad v \in \mathfrak{D}, s = \overline{1, k}, q = \overline{1, l}; \quad (3)$$

$$\min_v \left(\sigma_{cv}^2 = \frac{1}{kl(N-r_v)} \sum_{q=1}^k \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^N (\tau_i - A(\omega_i, a_{sq}^v))^2 \right) \Rightarrow v^*, \quad (4)$$

где r_v — количество оцениваемых параметров v -й реологической модели. Здесь индексы s и q указывают на принадлежность реологических свойств давлению p_s и температуре T_q .

В соответствии с (3) в каждой точке матрицы плана эксперимента оценивают реологические свойства \hat{a}_{sq}^v для сформированного класса \mathfrak{D} моделей. Условие (4) определяет выбор оптимальной реологической модели для матрицы плана эксперимента, а критерий σ_{cv}^2 является оценкой дисперсии адекватности v -й модели по данным матрицы плана эксперимента.

Остановимся теперь на особенностях построения уравнений состояния $a^v(x)$ для оптимальной v^* реологической модели. В принципе, может быть использована полиномиальная модель

$$a^v(x) = Bc(x), \quad (5)$$

или сплайновая модель вида [7]

$$a_i^v(x) = \sum_{j=1}^{kl} b_j G_{m,k}(x - x_j) + \sum_{j=1}^{q_3} b_{n+j}(x)^{\alpha_j}, \quad i = \overline{1, r_v}, \quad (6)$$

где $x = (p, T)^T$ — вектор параметров состояния;
 B — матрица параметров модели;
 $c(x) = (1, p, T, pT, p^2, T^2, \dots)^T$ — вектор базисных функций полиномиальной модели;
 b_j, b_{nj} — параметры аналитического представления сплайна для показателя a_j^v реологических свойств;

$$G_{m,k}(x - x_j) = \begin{cases} \|x - x_j\|^{2m-k} \ln \|x - x_j\|, & \text{если } k \text{ четное;} \\ \|x - x_j\|^{2m-k}, & \text{если } k \text{ нечетное;} \end{cases}$$

$$\|x - x_j\| = \left(\sum_{i=1}^k (x_i - x_{ij})^2 \right)^{1/2};$$

$$q_3 = (k + m - 1)! / (m - 1)! k!;$$

$\alpha_j = (\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{kj})$ — мультииндекс;

$$(x)^{\alpha_j} = (x_1)^{\alpha_{1j}} (x_2)^{\alpha_{2j}} \dots (x_k)^{\alpha_{kj}};$$

m — параметр вариационного функционала.

Параметры модели (5) определяют из условия

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{kl} \frac{1}{\sigma_{ij}^2} (c_{0j} + c_{1j}p_i + c_{2j}T_i + c_{3j}p_iT_i + c_{4j}p_i^2 + c_{5j}T_i^2 + \dots - a_{ij}^v)^2 \right\} \Rightarrow \{ \hat{c}_{ij} \}, \quad j = \overline{1, r_v},$$

где σ_{ij}^2 — оценки дисперсий показателей a_{ij}^v реологических свойств в i -й точке плана эксперимента ($i = \overline{1, kl}$).

Параметры сплайновой модели (6) находят из условия соответствия значениям реологических свойств во всех точках плана эксперимента.

Выбор модели для уравнений состояний определяется условиями ее применения и планом эксперимента. Полиномиальная модель (5) допускает статистическое оценивание результатов, а также незначительную экстраполяцию уравнений состояния за пределы области планирования экспериментов и ее используют для оптимальных планов экспериментов (ортогональные композиционные планы и др.). Сплайновая модель (6) применяется исключительно для интерполяции в пределах области эксперимента при произвольных планах.

Для реализации алгоритма (3) и (4), а также построения уравнений состояния (5) и (6) программа «Реометрия» [6] дополнена модулем пакетной обработки данных ротационной вискозиметрии и построения графических зависимостей $a^v(x)$.

В качестве примера рассмотрим результаты обработки экспериментальных данных (из базы данных пакета программ «Drillbench» [3]), полученных с помощью ротационного вискозиметра Fann 75 ($\alpha = 0,9365$) для бурового раствора на водной основе. В

Экспериментальные данные измерений реологических свойств

Давление, МПа	Температура, °С	Напряжения сдвига τ (Па) при частотах вращения ω , мин ⁻¹					
		3	6	100	200	300	600
0,1	50	7,50	8,00	14,50	20,50	25,50	40,00
	60	7,50	8,00	9,50	15,50	20,00	31,50
	90	7,66	8,14	10,05	13,89	16,76	24,42
	120	7,66	7,66	8,62	10,05	12,45	20,11
30	50	7,50	8,10	17,00	25,00	30,00	50,00
	60	8,00	8,00	15,00	20,50	26,00	43,00
	90	8,14	8,62	13,41	17,72	21,07	33,04
	120	7,66	7,66	12,93	15,80	18,19	27,29
35	50	8,10	8,50	17,00	25,50	32,00	55,00
	60	8,14	8,62	15,80	22,02	27,77	45,01
	90	8,62	8,62	14,36	18,19	22,02	33,99
	120	8,14	8,62	13,41	16,28	19,15	28,73
40	50	8,50	8,70	18,00	26,50	34,00	58,00
	60	8,62	8,62	16,76	22,98	29,21	49,32
	90	8,62	9,10	14,36	18,67	22,98	35,43
	120	8,62	8,62	14,36	16,76	19,87	31,12
45	50	8,50	8,50	18,50	27,00	35,50	59,00
	60	8,62	8,62	17,24	24,42	30,64	51,23
	90	9,10	9,10	14,84	19,15	23,46	37,83
	120	8,62	9,10	13,89	17,24	20,59	32,08

табл. 1 приведены результаты измерений напряжений сдвига τ при частотах вращения $\omega = \{3, 6, 100, 200, 300, 600\}$ мин⁻¹ для плана эксперимента с $k = 5$ уровнями давлений и $l = 4$ уровнями температур.

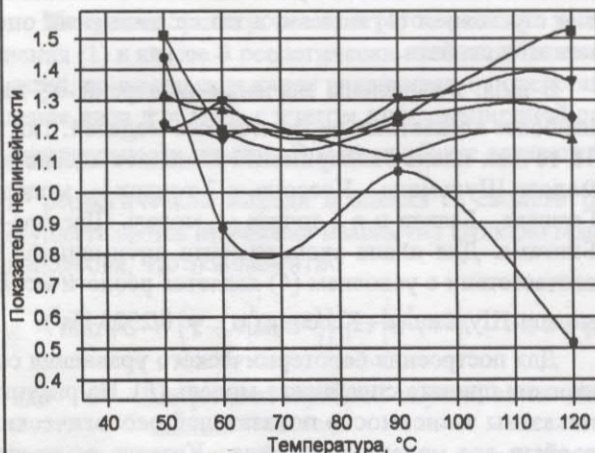
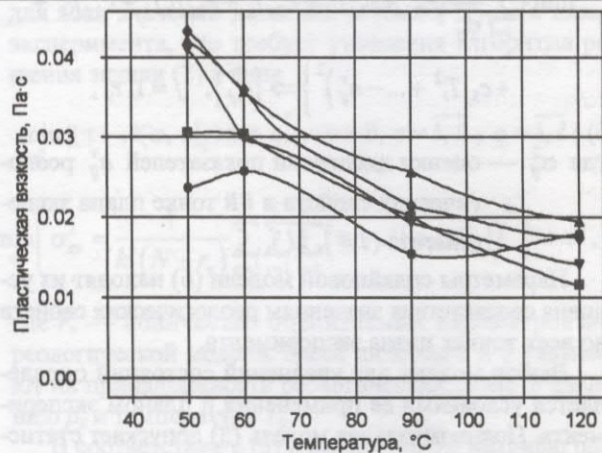
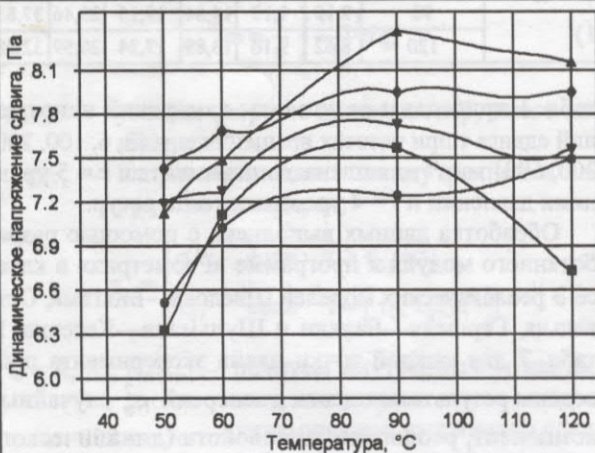
Обработка данных выполнена с помощью разработанного модуля к программе «Реометрия» в классе 9 реологических моделей Шведова—Бингама, Оствальда, Гершеля—Балкли и Шульмана—Кессона. В табл. 2 для каждой точки плана эксперимента приведены результаты оценок дисперсий σ_v^2 случайных компонент, реологических свойств (динамического напряжения сдвига τ_0 , пластической вязкости η , показателя нелинейности n) оптимальной в соответствии с условием (4) модели, а также дисперсий оценок этих свойств.

В табл. 2 выделены значения дисперсий σ_v^2 для наиболее адекватных реологических моделей. Так, в 16 точках плана эксперимента наиболее адекватна модель Шульмана—Кессона, в 2 точках — модель Гершеля—Балкли и в 2 точках — модель Шведова—Бингама. Для плана эксперимента оптимальной в соответствии с условием (4) является реологическая модель Шульмана—Кессона ($\sigma_{cv}^2 = 0,2325 \text{ Па}^2$).

Для построения баротермического уравнения состояния принята сплайновая модель (6). На рисунке показаны зависимости показателей реологических свойств для модели Шульмана—Кессона от температуры при постоянных и соответствующих плану

Основные результаты обработки экспериментальных данных

Давление, МПа	Температура, °С	Дисперсия случайной компоненты σ_v^2 (Па ²) для реологической модели				Реологические свойства ν^* -й модели			Дисперсии оценок реологических свойств ν^* -й модели		
		Шведова—Бингама	Оствальда	Гершеля—Балкли	Шульмана—Кессона	τ_0 , Па	η , Па·с	n	$\sigma_{\tau_0}^2$, Па ²	σ_{η}^2 , (Па·с) ²	σ_n^2
0,1	50	1,2400	11,91	0,0201	0,0288	6,515	0,0236	1,439	0,1556	0,0008	0,0419
	60	0,9866	16,64	1,2590	1,1900	7,023	0,0258	0,883	0,8546	0,0033	0,2039
	90	0,2282	8,59	0,2694	0,2809	7,241	0,0154	1,070	0,4453	0,0022	0,1490
	120	0,8628	9,89	0,0418	0,0148	7,492	0,0179	0,517	0,0840	0,0003	0,0250
30	50	2,5390	14,01	0,6382	0,5149	6,324	0,0306	1,508	0,6786	0,0033	0,1616
	60	0,4194	16,36	0,1400	0,0989	7,110	0,0303	1,202	0,2637	0,0012	0,0594
	90	0,3529	11,94	0,1185	0,0937	7,565	0,0201	1,231	0,2635	0,0013	0,0734
	120	0,9807	6,28	0,3357	0,2732	6,733	0,0116	1,522	0,5081	0,0024	0,1965
35	50	0,7364	19,67	0,2711	0,2248	7,185	0,0411	1,216	0,3988	0,0018	0,0758
	60	0,7708	16,37	0,0461	0,0155	7,270	0,0299	1,296	0,1079	0,0005	0,0244
	90	0,5831	11,80	0,1700	0,1269	7,728	0,0193	1,304	0,3146	0,0015	0,0886
	120	0,6012	8,03	0,2366	0,1887	7,557	0,0141	1,359	0,3952	0,0019	0,1344
40	50	0,7360	21,04	0,1231	0,0770	7,428	0,0433	1,225	0,2339	0,0010	0,0426
	60	0,5227	20,47	0,3045	0,2367	7,687	0,0360	1,177	0,4042	0,0018	0,0798
	90	0,3936	13,41	0,0392	0,0215	7,954	0,0214	1,249	0,1265	0,0006	0,0332
	120	0,7908	10,77	0,7648	0,6934	7,952	0,0175	1,245	0,7282	0,0036	0,2158
45	50	1,3600	19,25	0,0495	0,0533	7,123	0,0422	1,322	0,2024	0,0009	0,0384
	60	0,9314	19,27	0,2285	0,1594	7,485	0,0357	1,272	0,3425	0,0016	0,0692
	90	0,2301	17,21	0,1954	0,1691	8,368	0,0257	1,118	0,3423	0,0016	0,0787
	120	0,2998	12,09	0,2213	0,1891	8,159	0,0195	1,176	0,3741	0,0018	0,1031
$\sigma_{\tau_0}^2$, Па ²		0,7783	14,25	0,2736	0,2325						



Влияние термобарических условий на реологические свойства бурового раствора (а, б, в):

- — $p = 0,1$ МПа; ■ — $p = 30$ МПа; ▼ — $p = 35$ МПа;
- ◆ — $p = 40$ МПа; ▲ — $p = 45$ МПа

эксперимента значениях давления. Для пластической вязкости и динамического напряжения сдвига прослеживаются характерные тенденции их изменения в зависимости от температуры и давления.

Таким образом, с использованием строгих решений основного уравнения ротационной вискозиметрии (1) предложена методика обработки экспериментальных данных для построения баротермических уравнений состояний (5) или (6) реологических свойств. Для практической реализации методики в задачах гидравлической программы промывки скважин создан модуль к программе «Реометрия» [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Совершенствование технологии обработки трехшаро-

шечных долот при роторном бурении скважин / М.А. Мыслюк, Р.И. Стефурак, И.И. Рыбчич, Ю.М. Василюк. — М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2005. — 212 с.

2. www.lgc.com

3. www.petec.com

4. www.slb.com

5. Мыслюк М.А. О методике определения реологических свойств дисперсных сред по данным ротационной вискозиметрии // Инженерно-физический журнал. — 1988. — Т. 54, № 6. — С. 975—979.

6. Пакет программ для обработки данных ротационной вискозиметрии / М.А. Мыслюк, И.И. Рыбчич, Ю.М. Салыжин и др. // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2002. — № 10. — С. 24—26.

7. Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. — Новосибирск: Наука, 1983. — 214 с.

ЗАКАНЧИВАНИЕ СКВАЖИН

УДК 622.245.1

ОСОБЕННОСТИ КРЕПЛЕНИЯ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЕВЛОВ СКВАЖИН

Г.А. Белоусов, Б.М. Скориков, И.В. Майгуров
(ООО «ЛУКойл—ВолгоградНИПИморнефть»)

Вопросы крепления горизонтальных и наклонно направленных скважин (в том числе с большим углом отклонения от вертикали) приобретают все большее значение в связи с тем, что в последние годы наблюдается рост объемов бурения скважин указанного типа.

В настоящее время существует несколько технологий цементирования, основным недостатком которых является то, что в результате проникновения тампонажного раствора в продуктивный пласт значительно и необратимо ухудшаются его коллекторские свойства.

Следует отметить, что в случае устойчивого продуктивного пласта и спуска хвостовика-фильтра, что широко практикуется за рубежом, отпадает необходимость процесса цементирования, а следовательно, приведенные ниже технико-технологические мероприятия для горизонтальной части ствола скважины не имеют смысла, и единственным необходимым условием являются цементирование, герметизация и фиксирование головы хвостовика.

На многих месторождениях России были пробурены горизонтальные скважины. Крепление горизонтальных стволов на большинстве скважин осуществлялось с использованием фильтров. Например, на Ириновском месторождении на всех горизонтальных скважинах были спущены 139,7-мм эксплуатационные колонны, оборудованные в продуктивной части ствола фильтрами такого же диаметра с установкой в башмаке 245-мм промежуточной колонне пакера ПДМ-140.

В объединении ОАО «ЛУКойл—Нижневожскнефть» также был пробурен ряд скважин на Жирновской площади с горизонтальными участками по продуктивному пласту до 226 м. Все скважины построены по однотипной конструкции до горизонтальной части ствола. Кондуктор диаметром 426 мм спущен на глубину 26...32 м, 324-мм первая промежуточная колонна — на 196...200 м, вторая 245-мм колонна — на 584...622 м.

Эксплуатационные колонны диаметром 140 мм, длиной 825 и 844 м спущены соответственно в скважины № 958 и 967, а в скважины № 966 и 968 диаметром 168 и 140×168 мм, длиной 860 и 850 м. При этом все эксплуатационные колонны спущены до забоя в ствол диаметром 215,9 мм. Доспуск колонн до забоя в горизонтальной части скважины без осложнений осуществлен, по нашему мнению, благодаря благоприятному воздействию нефти в интервале продуктивного пласта, т. е., хорошим ее смазывающим свойствам, а также благодаря устойчивости стенок скважины.

В скважину № 958 была спущена сплошная эксплуатационная колонна и зацементирована по всей длине. На остальных скважинах в интервале продуктивного пласта спущены фильтры, и поэтому горизонтальная часть ствола не цементировалась. В кровле продуктивного пласта, в верхней части фильтра, на этих скважинах установлены заколонные герметизаторы (манжеты), выше которых поднят тампонажный раствор. Горизонтальная часть колонны ни на одной скважине не была отцентрирована. Если при