

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИОПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ БИОКАР

¹М.А. Мыслюк – д-р техн. наук, профессор, ¹В.В. Богославец – канд. техн. наук, доцент,
²Ю.В. Лубан – канд. техн. наук, заместитель директора, ²С.В. Лубан – заместитель директора,
²С.О. Ляшенко – инженер, ¹Л.И. Клебан – студент
 (¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,
²ООО Геосинтез инжиниринг, г. Полтава)

К числу важнейших требований к технологии бурения глубоких скважин в условиях высоких температур и давлений относятся контроль и управление фильтрационными свойствами буровых растворов. Проникновение фильтрата бурового раствора ухудшает коллекторские свойства продуктивных пластов, является причиной осложнений в бурении. В таких условиях целесообразны исследования фильтрационных свойств для обоснования регламентов и выбора оптимальных рецептур буровых растворов [1–3].

В работе [2] на основе анализа реологических, структурно-механических и фильтрационных свойств, а также показателя устойчивости аргиллита (согласно Hot Rolling Test по API RP 13 I) в присутствии солей хлоридов калия, формиатов натрия и калия изучалась стабильность биополимерных систем при температурах до 175 °С. Показано, что в буровых растворах с хлоридами натрия и калия крахмал может использоваться до температуры 120 °С, а с формиатами натрия и калия – до 150 °С.

Важным для выбора эффективных рецептур буровых растворов является анализ фильтрации в статических и динамических условиях, а также их влияние на свойства фильтрационных корок [1, 3]. Использование этих моделей позволяет прогнозировать скорость фильтрации и проникновение буровых растворов в пласт с учетом свойств сформированной корки [3].

В [4] изучены реологические свойства биополимерной системы Биокар при температурах до 150 °С для различных концентраций хлорида натрия ($c_c = 5...25$ % мас.) и органоминерального коагулянта Alevron® ($c_a = 0,25...1,5$ % мас.), построены уравнения состояния для параметров наиболее адекватной реологической модели Гершеля – Балкли. Ниже рассмотрены результаты исследований статической фильтрации Φ биополимерной системы Биокар на приборе Filter press HPNT с целью построения моделей для ее прогнозирования в зависимости от температуры T , концентраций реагентов для термостабилизации c_c и c_a перепада давлений Δp .

В исследованиях использовали латинский план эксперимента для переменных факторов на пяти уровнях: температура $T = (50, 70, 100, 130, 150)$ °С; содержание хлорида натрия $c_c = (5, 10, 15, 20, 25)$ %; содержание органоминерального коагулянта

Alevron® $c_a = (0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,50)$ %; перепад давлений $\Delta p = (3, 4, 5, 6, 7)$ МПа. Измерения проводили на стандартном бумажном фильтре с постоянным давлением 0,7 МПа на нижнем клапане прибора для предотвращения испарения фильтрата при высоких температурах. Общие сведения о составе и технологических свойствах биополимерной системы Биокар рассмотрены в [4]. Матрица плана эксперимента и результаты измерений показателей фильтрации приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Фильтрационные свойства биополимерной системы
Биокар**

Номер опыта	Факторы				Результаты измерений показателя фильтрации Φ , мл / 30 мин	Расчетные значения показателя фильтрации $\hat{\Phi}$, мл / 30 мин
	T , °С	c_c , %	c_a , %	Δp , МПа		
1	150	20	0,50	3	15,0	15,86
2	130	20	0,75	7	12,0	13,98
3	50	15	0,50	5	7,0	8,41
4	150	10	1,00	4	14,0	13,65
5	100	10	0,25	7	13,0	12,36
6	130	15	1,00	6	12,0	11,65
7	70	15	1,50	3	5,0	4,24
8	70	25	0,50	4	8,0	8,36
9	100	20	1,50	6	9,0	7,37
10	130	25	1,50	5	8,0	9,17
11	50	25	0,25	6	9,0	8,90
12	50	10	1,50	7	7,0	7,25
13	150	15	0,25	5	16,0	17,01
14	130	10	0,50	4	11,0	12,06
15	130	5	0,25	3	14,0	12,42
16	70	10	0,75	5	9,0	8,43
17	100	25	1,00	5	8,0	9,12
18	100	15	0,75	4	9,0	8,22
19	150	25	0,75	6	21,0	18,09
20	70	20	0,25	6	11,0	9,46
21	50	20	1,00	4	7,0	6,89
22	70	5	1,00	7	9,5	10,36
23	50	5	0,75	3	9,5	9,12
24	100	5	0,50	3	9,0	10,05
25	150	5	1,50	7	17,0	17,10

Параметры уравнений состояния показателей фильтрации биополимерной системы Биокар

Базисные функции b_i	Параметры модели (1)	Значения параметров B_i модели (1) при r_e						
		5	6	10	11	15	18	19
1	B_1	2,640	12,784	20,022	23,313	23,925	7,387	8,704
T	B_2	0,077	-0,158	-0,211	-0,216	-0,217	-0,126	-0,124
c_c	B_3	-0,054	0,054	-0,548	-1,211	-1,717	-1,425	-1,234
c_a	B_4	-2,690	-2,690	-9,662	-11,480	-14,123	-10,535	-13,822
Δp	B_5	0,688	0,688	0,610	0,709	1,813	7,083	7,025
Tc_c	$B_6 \cdot 10^3$	-	-	5,810	7,171	9,534	12,014	9,353
Tc_a	B_7	-	-	0,077	0,089	0,112	0,149	0,169
$T\Delta p$	B_8	-	-	-	-	-	-0,031	-0,035
$c_c c_a$	B_9	-	-	0,402	0,677	0,809	1,343	1,260
$c_c \Delta p$	B_{10}	-	-	-	-	0,047	-0,071	-0,118
$c_a \Delta p$	B_{11}	-	-	-	-	-0,319	-2,118	-1,988
$Tc_c c_a$	$B_{12} \cdot 10^3$	-	-	-4,823	-7,243	-9,611	-25,107	-24,147
$Tc_a \Delta p$	$B_{13} \cdot 10^3$	-	-	-	-	-	-	3,401
$c_c c_a \Delta p$	B_{14}	-	-	-	-	-	-0,103	-0,024
$Tc_c c_a \Delta p$	$B_{15} \cdot 10^3$	-	-	-	-	-	2,844	2,361
T^2	$B_{16} \cdot 10^3$	-	1,174	0,962	0,970	0,843	9,170	0,918
c_c^2	B_{17}	-	-	-	0,017	0,021	0,025	0,024
c_a^2	B_{18}	-	-	-	-	2,168	4,244	4,672
Δp^2	B_{19}	-	-	-	-	-0,152	-0,261	0,233
$S_e^2, (\text{мл/30 мин})^2$		4,367	2,830	2,871	2,370	2,752	3,038	3,496

Таблица 3

Статистические оценки параметров остатков уравнения состояния показателя фильтрации биополимерной системы Биокар

Статистические параметры остатков регрессионной модели (1)	Оценки параметров
Математическое ожидание $\bar{\Delta} \cdot 10^{12}$, мл/30 мин	-3,326
Среднеквадратическое отклонение S , мл/30 мин	1,176
Критерий $T_u \cdot 10^{12}$ проверки гипотезы $H_0: M\{\Delta\} = 0$	14,141
Коэффициенты корреляции:	
$r_{\Delta T} \cdot 10^{12}$	-0,737
$r_{\Delta c_c} \cdot 10^{12}$	-0,666
$r_{\Delta c_a} \cdot 10^{12}$	0,418
$r_{\Delta p} \cdot 10^{12}$	0,080
Критерии $T_u \cdot 10^{12}$ проверки гипотез:	
$H_0: \rho_{\Delta T} = 0$	3,684
$H_0: \rho_{\Delta c_c} = 0$	3,330
$H_0: \rho_{\Delta c_a} = 0$	2,089
$H_0: \rho_{\Delta p} = 0$	0,398

Аналогично [4] для обработки результатов измерений использованы регрессионные модели $\Phi(T, c_c, c_a, \Delta p)$ в виде полиномов второго порядка

$$\Phi(T, c_c, c_a, \Delta p) = \hat{B}b(T, c_c, c_a, \Delta p), \quad (1)$$

где $b(T, c_c, c_a, \Delta p)$ – вектор базисных функций полиномиальной модели (табл. 2). Оценки вектора параметров $\hat{B}$ в (1) и регрессионной модели $\hat{\varepsilon}$ для показателя фильтрации Φ построены в классе E различных сочетаний базисных функций из условия минимума дисперсии адекватности

$$\min \left\{ S_e^2 = \frac{1}{n - r_e} \sum_{i=1}^n [B_i b(T_i, c_{ci}, c_{ai}, \Delta p_i) - \Phi_i]^2 \right\} \Rightarrow \Rightarrow \{\hat{B}, \hat{\varepsilon}\}, \varepsilon \in E, \quad (2)$$

где r_e – число оцениваемых параметров в моделях (1); $T_i, c_{ci}, c_{ai}, \Delta p_i$ – данные плана эксперимента (см. табл. 1); Φ_i – результаты измерений показателей фильтрации.

Класс E сформирован из линейной части полинома с включением комбинаций произведений и квадратов исходных факторов (см. табл. 1) и составил 431 модель. В табл. 2 приведены построенные с помощью процедур (2) оценки параметров $\hat{B}$ и дисперсий адекватности S_e^2 для некоторых уравнений состояния (1) показателя фильтрации с различными сочетаниями базисных функций. Единицы измерений параметров B_i уравнений состояния соответствуют принятым в табл. 1 единицам измерений факторов и показателя фильтрации Φ .

Наиболее адекватная согласно условию (2) регрессионная модель (1) соответствует определенному сочетанию из 11 базисных функций и выделена в табл. 2. Расчетные значения показателя фильтрации $\hat{\Phi}$ по данной модели приведены в табл. 1. Следует отметить, что в пределах области планирования эксперимента наиболее адекватная модель является линейной относительно перепада давлений Δp на фильтрационную корку и не учитывает влияния произведений Δp с другими переменными факторами (см. табл. 2).

Оценка адекватности принятой регрессионной модели может быть выполнена на основании ре-

зультатов проверки совокупности статистических гипотез о характере распределения остатков $\Delta_i = \hat{\Phi}(T_i, c_{ci}, c_{ai}, \Delta p_i) - \Phi_i$, а именно об их центрированности $H_0: M\{\Delta\} = 0$ и некоррелированности $H_0: \rho_{\Delta x} = 0$, где M – символ математического ожидания; $\rho_{\Delta x}$ – коэффициент корреляции между Δ и переменными факторами $x = \{T, c_c, c_a, \Delta p\}$. В табл. 3 приведены статистические оценки параметров распределения остатков

регрессионных моделей и стандартные критерии для проверки сформулированных статистических гипотез. Низкие значения оценок параметров $(\bar{\Delta}, r_{\Delta x})$ и критериев (T_u) указывают на высокий доверительный уровень принятия соответствующих статистических гипотез H_0 (например, для доверительной вероятности 0,05 квантили распределения Стьюдента $t_{24;0.025} = 2,064$ и стандартизованного нормального распределения $u_{0.025} = 1,96$).

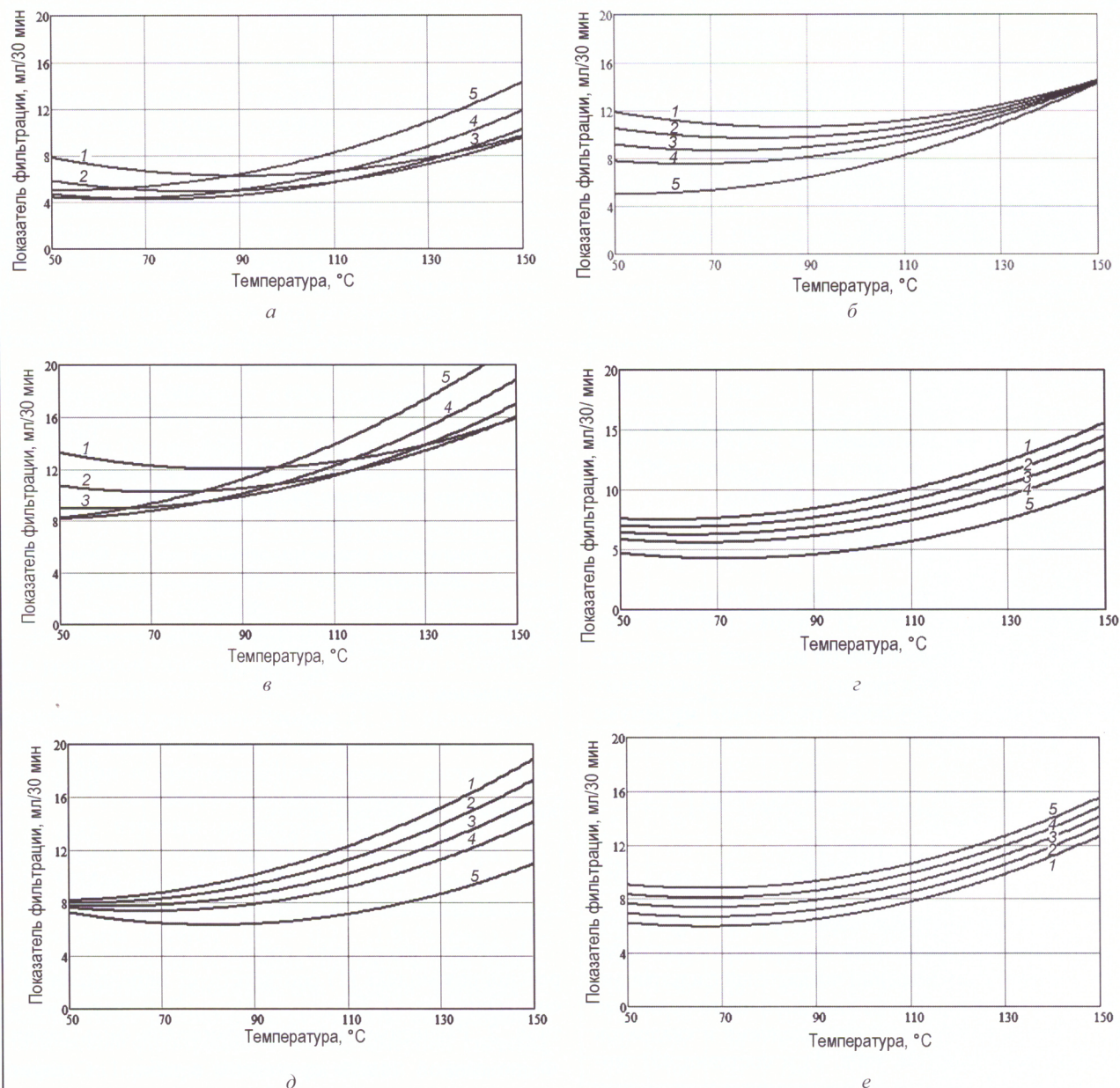


Рис. 1. Влияние концентраций хлорида натрия (а, в: 1 – $c_c = 5\%$; 2 – $c_c = 10\%$; 3 – $c_c = 15\%$; 4 – $c_c = 20\%$; 5 – $c_c = 25\%$), наполнителя Alevron® (б, з, д: 1 – $c_a = 0,25\%$; 2 – $c_a = 0,5\%$; 3 – $c_a = 0,75\%$; 4 – $c_a = 1,0\%$; 5 – $c_a = 1,5\%$) и перепада давления (е: 1 – $\Delta p = 3$ МПа; 2 – $\Delta p = 4$ МПа; 3 – $\Delta p = 5$ МПа; 4 – $\Delta p = 6$ МПа; 5 – $\Delta p = 7$ МПа) на зависимость показателя фильтрации биополимерной системы Биокар от температуры: а – $c_a = 1,5\%$, $\Delta p = 3$ МПа; б – $c_c = 5\%$, $\Delta p = 3$ МПа; в – $c_a = 0,25\%$, $\Delta p = 5$ МПа; з – $c_c = 15\%$, $\Delta p = 3$ МПа; д – $c_c = 20\%$, $\Delta p = 5$ МПа; е – $c_c = 20\%$, $c_a = 1,0\%$

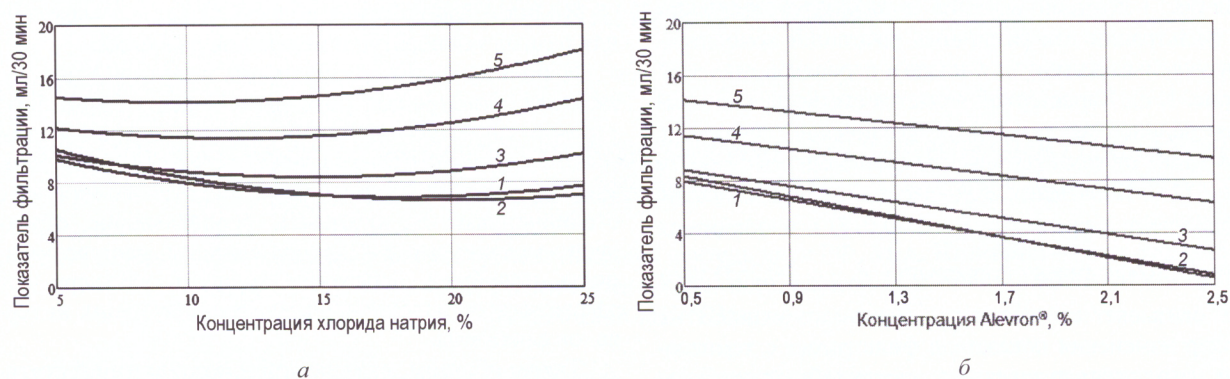


Рис. 2. Зависимость показателя фильтрации биополимерной системы Биокар от концентраций хлорида натрия ($c_a = 0,5\%$), наполнителя Alevron[®] ($c_c = 15\%$), перепада давления ($\Delta p = 3$ МПа) и температуры (1 – $T = 50$ °C; 2 – $T = 70$ °C; 3 – $T = 100$ °C; 4 – $T = 130$ °C; 5 – $T = 150$ °C)

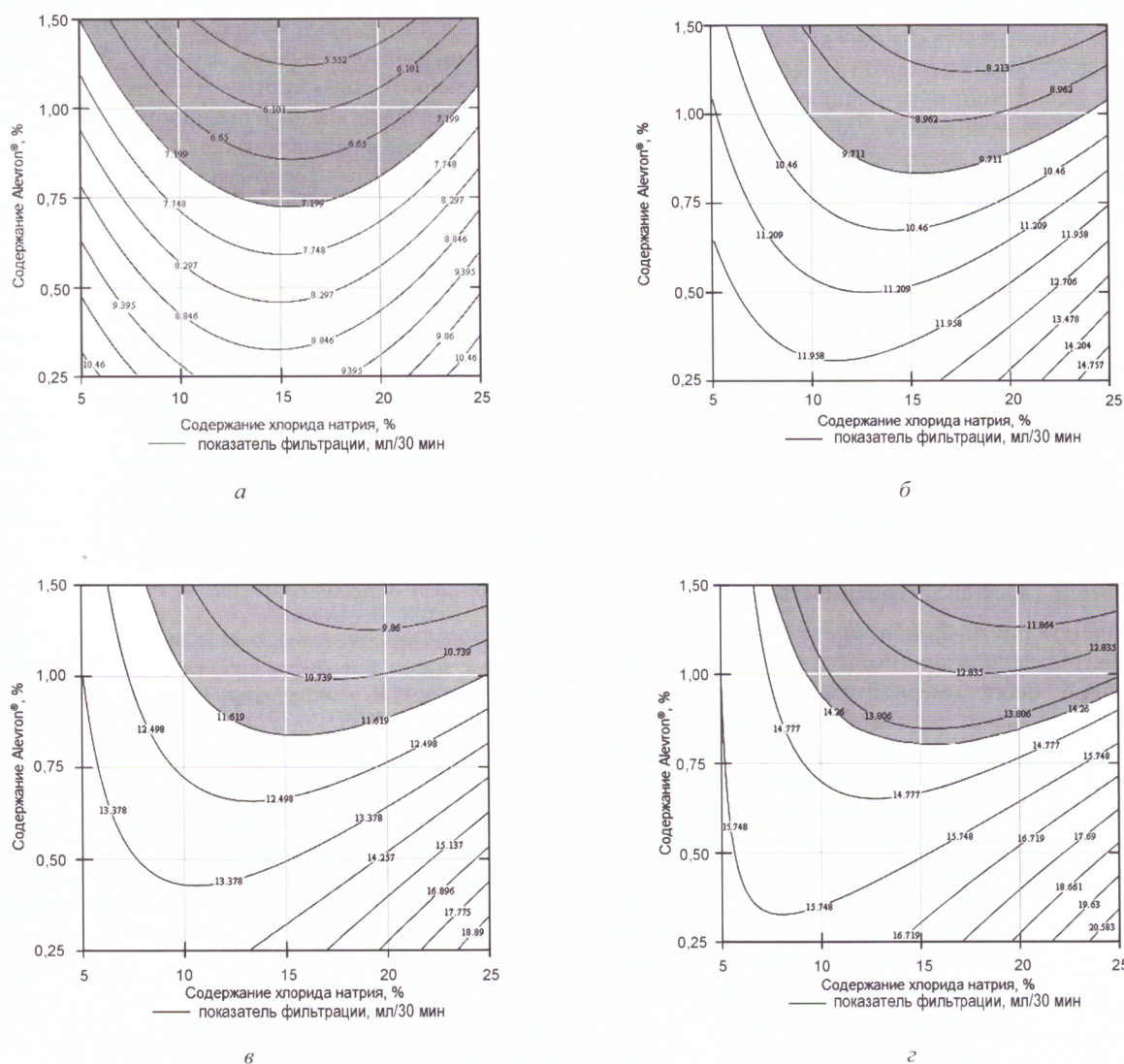


Рис. 3. Влияние температуры и перепада давления (а – $T = 100$ °C, $\Delta p = 3$ МПа; б – $T = 125$ °C, $\Delta p = 4$ МПа; в – $T = 140$ °C, $\Delta p = 4$ МПа; г – $T = 150$ °C, $\Delta p = 5$ МПа) на показатель фильтрации биополимерной системы Биокар от концентраций хлорида натрия и наполнителя Alevron[®]

На рис. 1 показано влияние температуры на показатель фильтрации для различных сочетаний концентраций изучаемых реагентов, а также и перепадов давлений (см. рис. 1, е). Характерной является статистически значимая нелинейная тенденция увеличения показателя фильтрации от температуры (коэффициент корреляции $r_{\phi T} = 0,773$). Повышение концентраций хлорида натрия (коэффициент корреляции $r_{\phi c_c} = -0,077$) и наполнителя Alevron® (коэффициент корреляции $r_{\phi c_a} = -0,263$) почти не оказывает статистически значимого влияния на характер изменения показателя фильтрации с температурой, что подтверждает их термостабилизирующее действие на биополимерную систему Биокар [4]. Для высоких концентраций хлорида натрия и наполнителя Alevron® наблюдается снижение степени влияния температуры на показатель фильтрации. Отметим также статистически незначимое влияние перепада давления Δp на зависимость показателя фильтрации от температуры (коэффициент корреляции $r_{\phi \Delta p} = 0,252$).

На рис. 2 показаны характерные зависимости показателя фильтрации Φ от концентраций хлорида натрия и наполнителя Alevron® в изучаемом диапазоне их изменения для фиксированных температуры и перепада давлений. Для хлорида натрия зависимость $\Phi(c_c)$ в определенных условиях имеет минимум (см. рис. 2, а), концентрация c_{ci}^* в исследуемом диапазоне оценивается из (1)

$$c_c^* = \begin{cases} (B_3 + B_6 T + B_9 c_a + B_{12} T c_a) / (-2B_{17}), & \text{если } c_c^* \in [c_c^{\min}, c_c^{\max}]; \\ c_c^{\min}, & \text{если } \Phi(c_c^{\min}) < \Phi(c_c^{\max}); \\ c_c^{\max}, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $c_c^{\min}, c_c^{\max}$ – нижняя и верхняя граница изменения концентрации в плане эксперимента (см. табл. 1). Для наполнителя Alevron® зависимость $\Phi(c_a)$ является линейной (см. рис. 2, б, табл. 2).

Анализ результатов исследований статической фильтрации биополимерной системы Биокар подтверждает механизм термостабилизирующего действия хлорида натрия и органогенного наполнителя Alevron® [4], который связан с увеличением общей минерализации и усилением процессов гелеобразования, а также уплотнения фильтрационной корки и повышения реологических свойств.

На рис. 3 для фиксированных температур $T = \text{idem}$ и перепадов давлений $\Delta p = \text{idem}$ показаны зависимости $\Phi(c_c, c_a) = \text{idem}$, которые иллюстрируют допустимую область $\Omega_\Phi(c_c, c_a)$ концентраций хлорида натрия и наполнителя Alevron®

$$\Omega_\Phi(c_c, c_a) : \Phi \leq \Phi^{\max}, c_c^{\min} \leq c_c \leq c_c^{\max}, c_a^{\min} \leq c_a \leq c_a^{\max},$$

где $\Phi^{\max}, c_c^{\min}, c_a^{\min}, c_c^{\max}, c_a^{\max}$ – ограничения на показатели фильтрации и концентрации реагентов по плану эксперимента.

На рис. 3 допустимая область $\Omega_\Phi(c_c, c_a)$ выделена для разных температур и перепадов давлений.

Использование регрессионной модели (1) для показателя фильтрации позволяет более обоснованно строить систему ограничений на концентрации реагентов с учетом термобарических условий для конкретных пластов разреза скважины. Это в сочетании с ограничениями на плотность, реологические, структурно-механические и другие свойства дает возможность подобрать рецептуру бурового раствора для эффективного разбуривания соответствующих интервалов скважины.

Таким образом, на основании исследований статической фильтрации биополимерной системы Биокар установлена возможность ее регулирования при температурах до 150 °С и перепадах давлений до 7 МПа за счет выбора концентраций хлорида натрия и наполнителя Alevron®. Получены регрессионные зависимости показателя фильтрации от параметров состояния в диапазоне температур 50...150 °С с концентрациями добавок хлорида натрия 5...25 % и органо-минерального кольматанта Alevron® 0,25...1,50 %. Последние являются информационным обеспечением задачи выбора оптимальных рецептур системы Биокар для конкретных горно-геологических условий бурения с учетом термобарических условий скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов / промысловых жидкостей. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
2. Valizadeh M., Nasiri A.R. Improving Thermal Stability of Starchin Formate Fluids for Drilling High Temperature Shales // J. of Petroleum Science and Technology. – Vol. 2, No. 1. – 2012. – P. 61–64.
3. The influence of chemical additives in filtration control of Inhibited Drilling / A.P.T. Dantas, R.S. Leite, R.C.A.M. Nascimento, L.V. Amorim // Brazilian J. of Petroleum and Gas. – Vol. 8, No. 3. – 2014. – P. 97–108.
4. Мыслук М.А. Исследование реологических свойств биополимерной системы Биокар / М.А. Мыслук, В.В. Богославцев, Ю.В. Лубан, С.В. Лубан, С.О. Ляшенко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2015. – № 8. – С. 31–36.

LITERATURA

1. Grey Dzh.R., Darli G.S.G. Sostav i svoystva burovyykh agentov / promyvochnyykh zhidkostey. – M.: Nedra, 1985. – 509 s.
2. Valizadeh M., Nasiri A.R. Improving Thermal Stability of Starchin Formate Fluids for Drilling High Temperature Shales // J. of Petroleum Science and Technology. – Vol. 2, No. 1. – 2012. – P. 61–64.
3. The influence of chemical additives in filtration control of Inhibited Drilling / A.P.T. Dantas, R.S. Leite, R.C.A.M. Nascimento, L.V. Amorim // Brazilian J. of Petroleum and Gas. – Vol. 8, No. 3. – 2014. – P. 97–108.
4. Issledovanie reologicheskikh svoystv biopolimernoy sistemy Biokar. / M.A. Myslyuk, V.V. Bogoslavets, Yu.V. Luban, S.V. Luban, S.O. Lyashenko // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – M.: OAO «VNIIOENG», 2015. – № 8. – S. 31–36.