



УДК 622.245.4

Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов

С.Е.ЧЕРНЫШОВ¹, В.И.ГАЛКИН¹, З.В.УЛЬЯНОВА¹, Дэвид Иаин Макферсон МАКДОНАЛД²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Абердинский университет, Абердин, Шотландия, Великобритания

Нефтегазодобывающие компании предъявляют все более высокие требования к качеству крепления обсадных колонн скважин, в том числе к процессу непосредственной закачки и продавки тампонажного раствора с учетом требований к высоте подъема тампонажного раствора в кольцевом пространстве, исключения вероятного ГРП, разрабатывая при этом гидравлическую программу цементирования. Необходимо предотвратить глубокое проникновение фильтрата тампонажного раствора в проницаемые пласты для исключения загрязнения продуктивных толщ. Выполнить одновременно все указанные требования без использования модифицирующих добавок невозможно, все чаще разрабатываются и применяются сложные цементные композиции. При этом необходимость корректировки рецептур тампонажных составов появляется практически для каждой конкретной скважины.

С целью выбора и обоснования рецептур тампонажных составов, а также для оперативной корректировки с учетом требований проектных документов и геолого-технических условий цементирования обсадных колонн были разработаны математические модели основных технологических свойств тампонажных растворов для крепления эксплуатационных колонн скважин в условиях Пермского края. Выполнен анализ влияния поликарбоксилатного пластификатора (Пл) и понизителя фильтрации на основе гидроксипропилацеллюлозы (Пф) на пластическую вязкость (В), растекаемость (Р) и фильтрацию (Ф) тампонажных растворов. Разработка математических моделей выполнена по данным более 90 измерений.

Ключевые слова: добывающая скважина; цементирование обсадной колонны; технологические свойства тампонажного раствора; моделирование свойств тампонажных растворов; технология цементирования; качество крепления

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края при реализации проекта МИГ-21 (Соглашение № С-26/785 от 21.12.2017).

Как цитировать эту статью: Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов / С.Е.Чернышов, В.И.Галкин, З.В.Ульянова, Дэвид Иаин Макферсон Макдоналд // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 179-190. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.179

Введение. Рецептуры тампонажных растворов для крепления обсадных колонн скважин подвергаются частой корректировке из-за необходимости одновременного соблюдения следующих требований: растворы должны быть легко прокачиваемы, обладать реологическими свойствами, позволяющими предотвратить возникновение ГРП в процессе цементирования, иметь пониженный показатель фильтрации, отвечать всем требованиям к основным технологическим свойствам [1, 5-7].

Многие исследователи изучают влияние различных модифицирующих добавок на основные технологические свойства тампонажных растворов. В результате разрабатываются рецептуры с учетом особенностей условий ведения цементировочных работ на скважине и требований проектных документов, включающих понизители фильтрации, пластификаторы, пеногасители, расширяющие добавки и др. [1, 4, 6, 7, 9, 12, 20]. Требования к современным тампонажным составам определяются применяемой технологией крепления обсадных колонн скважин, точное управление их основными технологическими свойствами определяет возможность реализации выбранного способа цементирования [8, 10, 11, 29].

Большое внимание российских и зарубежных исследователей уделяется реологическим свойствам, которые определяют гидравлическую программу цементирования с учетом высоких забойных температур и давления [5, 13, 15, 21, 22]. Поэтому, кроме разработки непосредственно рецептур тампонажных растворов, предлагаются к применению различные методики исследований свойств, приближающие условия проведения лабораторных испытаний к реальным промышленным [14, 24, 27].

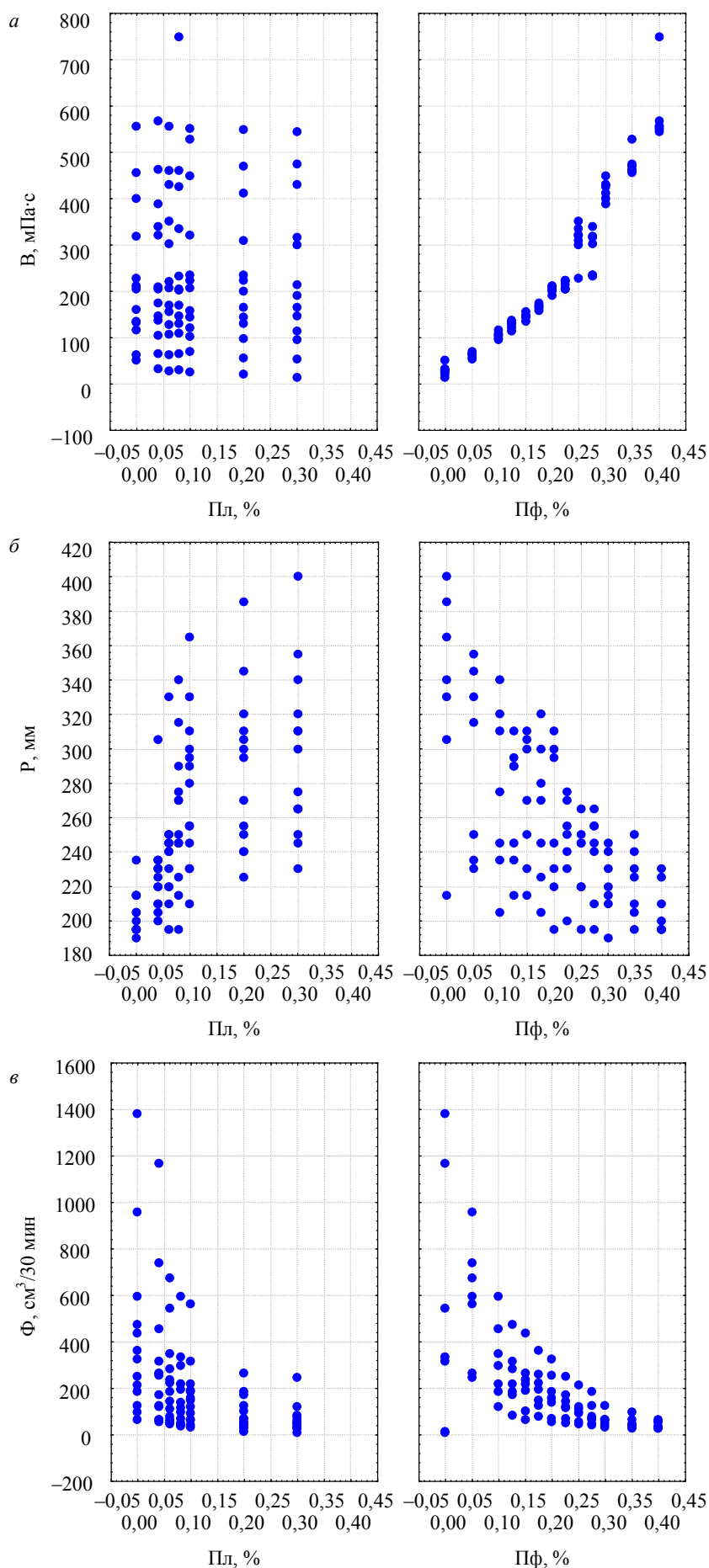


Рис.1. Поля корреляции между V и Пл , Пф (а); P и Пл , Пф (б); Φ и Пл , Пф (в)

Большой объем результатов лабораторных испытаний позволяет применять методы математического моделирования для сокращения числа экспериментов и использовать полученные модели для оперативного управления основными технологическими свойствами [17, 18, 23, 26, 30]. Однако, эти модели описывают один из показателей технологических свойств и влияние только одного компонента на какой-либо базовый состав и являются неполными.

Постановка проблемы. Для оперативной корректировки рецептур тампонажных составов с учетом требований к основным технологическим свойствам проектных документов и геологотехнических условий цементирования обсадных колонн была поставлена задача разработки математических моделей, описывающих изменение параметров тампонажных растворов в зависимости от объема вводимых модифицирующих добавок.

За основу принята следующая рецептура тампонажного состава: портландцемент марки ПЦТ-I-G-CC; пеногаситель (ПГ) на основе полиолов и эфиров жирных кислот – 0,2 %; В/СМ отношение – 0,46. В указанную рецептуру вводились модифицирующие добавки для получения требуемых показателей основных технологических свойств [1, 11].

По результатам лабораторных исследований отмечено, что используемый реагент – пеногаситель не оказывает влияния на рассматриваемые и моделируемые технологические свойства. Введем ограничения применимости разрабатываемых математических моделей: температурные условия $25 \pm 4^\circ \text{C}$; плотность тампонажного раствора $1,87 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$.

Методология. На первом этапе исследований были построены

поля корреляции между В и Пл, Пф; Р и Пл, Пф; Ф и Пл, Пф (рис.1) и вычислены коэффициенты парной корреляции r между рассматриваемыми модифицирующими добавками и изучаемыми показателями технологических свойств тампонажных растворов [3, 16].

Анализ построенных полей корреляции показывает, что соотношения и сила корреляционных связей между В, Р, Ф и Пл, Пф имеют различные виды.

Конфигурация полей корреляции свидетельствует о том, что пластификатор имеет очень незначительное влияние на пластическую вязкость, в то время как влияние понизителя фильтрации на тот же параметр является существенным. При этом в диапазоне концентраций Пф 0-0,225 % пластическая вязкость зависит преимущественно от Пф, а при большей его концентрации ($\geq 0,250$ %) некоторый вклад в формирование значений В начинает вносить и Пл, не демонстрируя при этом линейной зависимости, указывая на сложность и возможную взаимообусловленность влияния Пл и Пф на В. Вид полей корреляции свидетельствует, что наблюдается антагонизм Пл и Пф по их влиянию на Р и совместное однонаправленное действие на Ф.

Расчет регрессионных коэффициентов в разрабатываемых моделях выполнялся при помощи метода наименьших квадратов. Возможности использования статистических методов для решения аналогичных задач приведены в работах [3, 16]. Отметим, что модели строятся отдельно по Ф, Р и В.

Сравним средние значения фактической Φ и модельной Φ^M в выделенных интервалах с помощью вычисления критерия t_p по следующей формуле

$$t_p = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \left(\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right)}},$$

где X_1, X_2 – соответственно средние значения Φ и Φ^M ; S_1^2, S_2^2 – дисперсии.

Различие в средних значениях считается статистически значимым, если $t_p > t_t$. Значения t_t определяли в зависимости от количества сравниваемых данных и уровня значимости ($\alpha = 0,05$).

Сравнение средних значений показало, что по Φ и Φ^M они статистически не различаются в обоих случаях, при $p < 0,05$. Для более глубокого статистического анализа значений Φ и Φ^M исследовали их распределение. Оптимальные величины интервалов значений показателей вычисляются по формуле Стерджесса:

$$\Delta X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,32 \lg N},$$

где X_{\max} – максимальное значение показателя; X_{\min} – минимальное значение показателя; N – количество данных.

В каждом интервале определяются частоты:

$$P(X) = N_k / N_g,$$

где $P(X)$ – частота в k -м интервале для группы Φ ($q = 1$); $q = 2$ соответствует группе Φ^M ; N_k – число случаев содержания показателя $P(X)$ в k -м интервале; N_g – объем выборки для классов 1 и 2.

При сравнении плотностей распределений показателей в изучаемых классах применялась статистика Пирсона:

$$\chi^2 = N_1 N_2 \sum_{i=1}^e \frac{1}{M_1 + M_2} \left(\frac{M_1}{N_1} - \frac{M_2}{N_2} \right)^2,$$

где N_1, N_2 – соответственно количество значений Φ и Φ^M (классы 1, 2); M_1, M_2 – количество значений, попавших в заданный интервал, соответственно для двух изучаемых классов; e – количество интервалов [3, 16].

Обсуждение. Для построения моделей фильтрации в различных диапазонах сформировали изучаемую выборку по принципу от минимального ($\Phi_{\min} = 10 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$) до максимального ($\Phi_{\max} = 1381 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$) значений. Количество изучаемых показателей равно двум, поэтому пер-

вая модель строится по трем данным. Следующая модель будет построена при $n = 4$ и так далее до $n = 91$.

В результате по влиянию реагентов Пл и Пф на свойство Φ было выделено три группы значений. Для первой группы получена уточненная нелинейная модель (диапазон $\Phi < 80 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$):

$$\Phi^{M1} = 388 - 1479,9\text{Пф} - 920,1\text{Пл} + 1600,1\text{Пл} \cdot \text{Пф} + 1599,9\text{Пф}^2 + 1000,1\text{Пл}^2,$$

при $R = 0,999$, $p < 0$ ошибка прогноза равна $0,002 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$.

Для второй группы значений получена следующая модель ($80 < \Phi < 380 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$):

$$\Phi^{M2} = 440,81 - 1022,38\text{Пф} - 757,82\text{Пл},$$

при $R = 0,982$, $p < 0$ ошибка прогноза равна $34,015 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$.

Для третьей группы модель имеет следующий вид ($\Phi > 380 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$):

$$\Phi^{M3} = 1221,67 - 5309,76\text{Пф} - 5149,04\text{Пл},$$

при $R = 0,893$, $p < 0$ ошибка прогноза равна $149,87 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$.

По приведенным формулам были вычислены значения Φ^{M1} , Φ^{M2} , Φ^{M3} и сопоставлены с фактическими значениями Φ .

С практической точки зрения больший интерес представляет интервал значений Φ , соответствующий первому классу (наименьшие значения показателя фильтрации), поскольку отражает требования подавляющего большинства регламентирующих документов по креплению обсадных колонн наиболее ответственных участков ствола нефтяных и газовых скважин. Ошибка прогноза также минимальна, что позволит очень точно вычислять значения Φ^M по известным значениям Пл и Пф. При этом необходимый интервал значений Φ может быть достигнут во всем диапазоне концентраций Пл за счет варьирования содержания Пф.

Для графического решения вопроса выбора рецептуры тампонажных составов с учетом требований к основным технологическим свойствам построен график зависимости Φ^{MM} от Пл и Пф (рис.2). Подобные графические решения были получены и для других технологических свойств тампонажных растворов. По графику (рис.2) представляется возможным определить те значения концентрации Пл и Пф, при которых значения Φ^{MM} будут минимальны и иметь значения, удовлетворяющие требованиям проектной документации.

Анализ сопоставления модельных и фактических значений показал, что нелинейная модель в выделенном диапазоне значений Пл, Пф работает значительно лучше, чем другие разработанные модели.

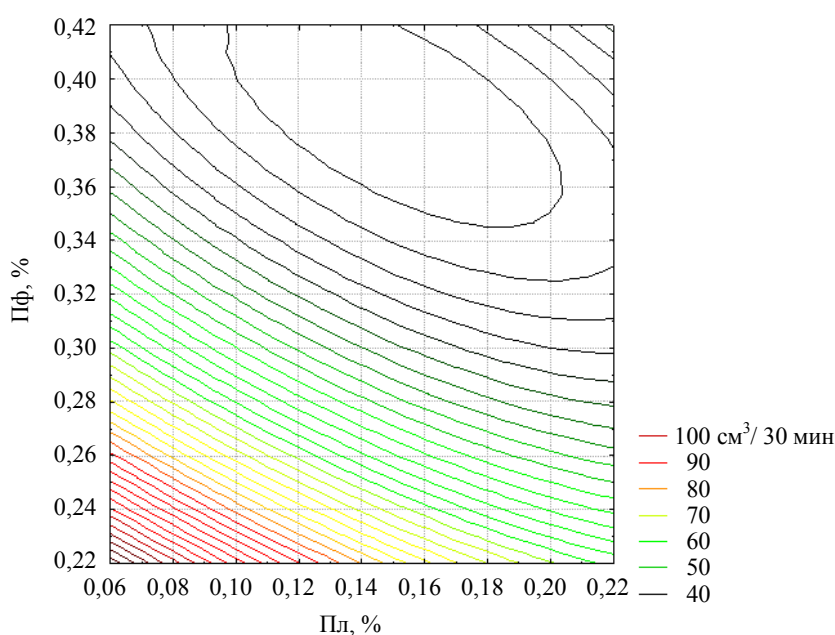


Рис.2. График зависимости Φ^{MM} от Пл и Пф

Необходимо отметить, что даже в этом случае наблюдаются пять значений, когда значения Φ и Φ^{MM} значительно не совпадают. Было установлено, что эти несовпадения имеют место в тех случаях, когда используется нулевая концентрация Пф в диапазоне концентраций пластификатора более $0,06 \%$. Выявленное явление связано с процессом проведения замера данного параметра.

Показатель фильтрации является прямым отражением способности системы к фильтратоотдаче, реализованной в условиях конкретной приборной ситуации – процедуры замера параметра. Потенциаль-

ная способность системы к фильтратоотдаче напрямую зависит от количества свободной дисперсионной среды, которая может быть отфильтрована через фильтр определенного диаметра при заданном перепаде давлений. Дисперсионная среда представлена преимущественно молекулами растворителя (в данном случае воды), свободных от участия в формировании сольватных оболочек вокруг цементных зерен. При замере параметра загруженный в камеру фильтр-пресса, представляющую собой вертикальный цилиндр, тампонажный раствор подвергается перепаду давлений, при котором дисперсионная среда начинает отфильтровываться через расположенный снизу фильтр. При проведении замера ввиду отсутствия перемешивания система подвержена седиментационному разделению, вследствие которого тяжелые частицы цемента опускаются по направлению к фильтру и, уплотняясь, формируют физический барьер, препятствующий свободному отфильтровыванию дисперсионной среды. Адсорбировавшиеся на поверхности зерен цемента молекулы пластификатора увеличивают подвижность частиц цемента, особенно в условиях низкой вязкости окружающей частицы жидкой фазы. Такое увеличение подвижности напрямую зависит от концентрации пластификатора и, начиная с некоторой его концентрации (в данном случае с 0,06 %), имеет существенное влияние при проведении процедуры замера показателя фильтрации. Это влияние компенсируется при наличии в системе минимального количества понизителя фильтрации, ввод которого обеспечивает загущение водной фазы тампонажного раствора, что существенно замедляет седиментационный процесс. Изложенное показывает, что удовлетворительная седиментационная устойчивость достигается при концентрации $P_f \geq 0,05$ %.

Таким образом, данные, полученные для нулевой концентрации P_f , не должны использоваться при построении моделей, так как не отражают реального состояния системы по ее способности к фильтратоотдаче и являются результатом искажения вследствие заметного влияния седиментации.

Далее по такой же методике были построены модели по технологическим свойствам тампонажных растворов P и B .

Сопоставление соотношений P и R^M в отличие от соотношений Φ и Φ^M показывает, что значительной нелинейности между ними не наблюдается. По принципу, который был изложен выше, было построено 83 многомерных моделей. Анализ соотношений P и R показал, что наблюдаются три вида соотношений. Первый участок, где имеется значительное увеличение значений R от 0,177 до 0,810 в диапазоне 190-250 мм. Второй участок в интервале 250-300 мм, здесь происходит незначительное изменение значений R . На третьем участке в диапазоне $P > 300$ мм наблюдается незначительное увеличение значений R . Анализ моделей растекаемости позволил установить три разновидности влияния. При значениях $P < 240$ мм влияние значений P_l и P_f практически одинаково, при P в диапазоне 240-340 мм наблюдается более высокое влияние P_l , далее наблюдается инверсия влияния значений P_f и P_l , т.е. влияние P_f становится более значительным, чем P_l .

Таким образом, по влиянию реагентов P_l и P_f на свойство P было выделено три группы значений. Для первой группы получена нелинейная модель (диапазон $P < 240$ мм):

$$R^{MM} = 220,079 + 594,23P_l - 54,7803P_f - 661,3888P_l^2 - 644,0422P_f \cdot P_l - 81,8865P_f^2,$$

при $R = 0,885$, $p < 0$ ошибка прогноза равна 7,29 мм.

Для второй группы получена модель ($240 < P < 350$ мм):

$$R^{MM} = 271,124 + 836,3447P_l - 464,8676P_f - 1326,5561P_l^2 - 905,5659P_f \cdot P_l + 803,4287P_f^2,$$

при $R = 0,889$, $p < 0$ ошибка прогноза равна 14,66 мм.

Для третьей группы модель имеет вид ($P > 350$ мм):

$$R^{MM} = 348,333 - 916,667P_f + 175,000P_l,$$

при $R = 0,998$, $p < 0$ ошибка прогноза равна 2,04 мм.

С практической точки зрения больший интерес представляет интервал значений P , соответствующий первому классу ($P < 240$ мм), поскольку отражает требования проектной документации на строительство скважин. Ошибка прогноза для этого интервала значений P (180-240 мм)

составляет 2-4 %, что позволит весьма точно вычислять значения R^M по известным значениям Пл и Пф. При этом необходимый интервал значений R может быть достигнут во всем диапазоне концентраций Пф за счет варьирования содержания Пл.

При разработке моделей пластической вязкости установлено, что происходит формирование значений B в зависимости от Пл и Пф по двум моделям. При значениях $B < 240$ мПа·с в формировании значений участвуют Пф и Пл. В остальных случаях значение B формируется только за счет Пф.

Всего построено 84 многомерных моделей. По влиянию Пл и Пф на B было выделено две группы значений, разделение на группы происходит в основном по показателю концентрации реагента Пф.

Для первой группы значений получена модель ($B < 240$ мПа·с)

$$B^{M1} = 29,294 + 819,8383\text{Пф} - 32,8641\text{Пл},$$

при $R = 0,989$, $p < 0$ ошибка прогноза равна 9,409 мПа·с.

Для второй группы значений с целью выявления участков, где могут наблюдаться нелинейности, была построена нелинейная модель влияния Пф, Пл на пластическую вязкость. Сопоставлены результаты исследований с описанием физико-химических процессов, происходящих при затворении тампонажного раствора по анализируемым рецептурам.

Известно, что молекулы эфиров целлюлозы являются умеренно жесткоцепными, при этом независимое положение каждой молекулы (их свободная ориентация) возможно только в относительно разбавленных растворах. По мере увеличения числа жестких макромолекул в заданном объеме раствора вероятность их произвольной ориентации будет все меньше, и при достижении некоторой критической концентрации дальнейшее увеличение числа макромолекул в этом объеме окажется невозможным без взаимного упорядочения их части. Поэтому, начиная с некоторой критической концентрации полимера, в системе возникает дополнительная фаза, представленная упорядоченными макромолекулами. При еще большем возрастании концентрации полимера доля упорядоченной фазы будет расти до тех пор, пока все макромолекулы не будут взаимно упорядочены [2].

Для растворов жесткоцепных полимеров характерна следующая концентрационная зависимость вязкости. Сначала с увеличением концентрации полимера кривая проходит через максимум, отвечающий критической концентрации, при которой начинается формирование анизотропной (жид-

кокристаллической фазы). Затем кривая проходит через минимум, соответствующий переходу системы в полностью упорядоченное анизотропное состояние. Падение вязкости обусловлено послойным течением анизотропных растворов, которое оказывает меньшее сопротивление течению, чем сетка зацеплений молекул в изотропных растворах [25].

При дальнейшем увеличении концентрации полимера вязкость снова начинает возрастать вследствие образования флуктуационной сетки между жидкокристаллическими доменами анизотропной фазы [19], а также уменьшения доли свободного растворителя. Такой характер зависимости сохраняется и в наполненных мелкодисперсными частицами растворах производных целлюлозы [28].

Таким образом, для второй группы значений получена уточненная нелинейная модель ($B > 240$ мПа·с):

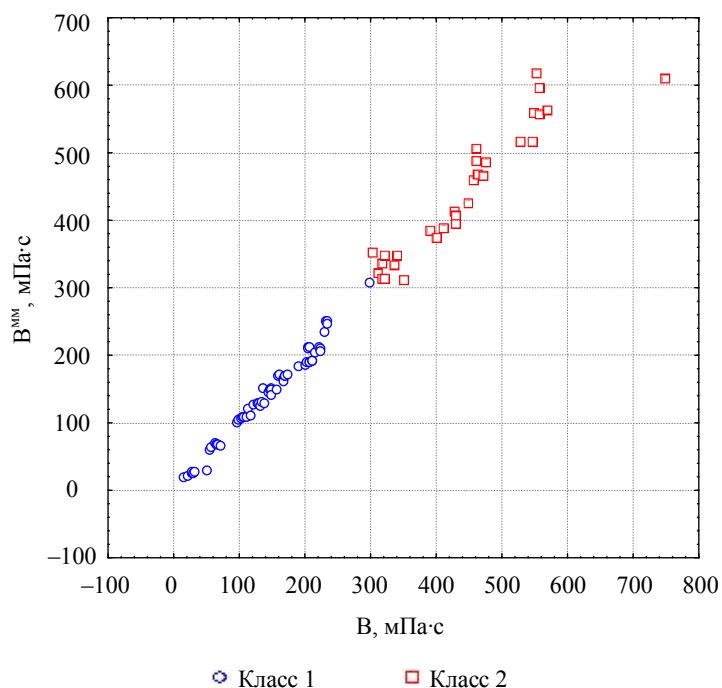


Рис.3. Поле корреляции между B^{MM1} , B^{M1} и B

$$B^{MM1} = -43,621 + 2811,9621Пл + 365,5409Пф - 8351,5551Пл^2 - 2275,8001Пф \cdot Пл + 2564,79Пф^2,$$

при $R = 0,991$, $p < 0$ ошибка прогноза равна 12,964 мПа·с.

По приведенным формулам были вычислены модельные значения пластической вязкости и сопоставлены с фактическими значениями (рис.3). Видно, что значения B^{MM1} , B^{M1} и B хорошо совпадают на всем диапазоне значений. Результаты математического моделирования подтверждаются особенностями реологического поведения тампонажных растворов с различной концентрацией реагентов Пф и Пл.

Анализ полученных в ходе проведенного исследования экспериментальных данных показывает, что особенность реологического поведения сохраняется в диапазоне концентраций пластификатора 0-0,200 % (рис.4). При этом максимум, отвечающий началу появления анизотропной

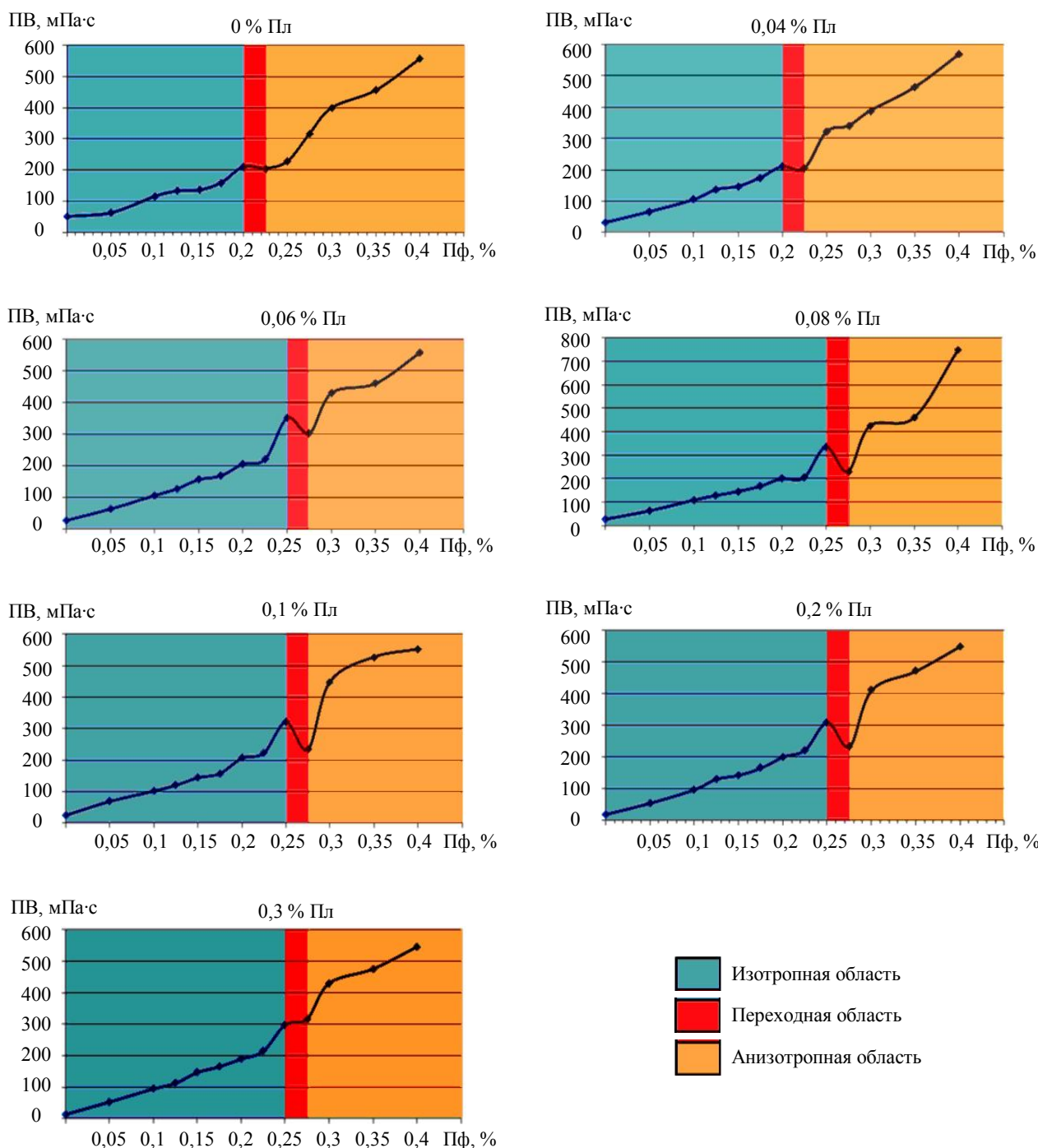


Рис.4. Зависимость пластической вязкости (ПВ) тампонажного раствора от концентрации Пф при разных концентрациях Пл

фазы в растворе ГЭЦ, и минимум, отвечающий полной анизотропизации раствора, смещаются от 0,200 и 0,225 % ГЭЦ при концентрациях пластификатора $< 0,06$ % в сторону увеличения концентраций ГЭЦ (0,250 и 0,275 %) при концентрациях пластификатора $\geq 0,06$ %.

Такая картина хорошо согласуется с механизмом действия пластификатора, который заключается в том, что адсорбируясь на зернах цемента, он вытесняет с их поверхности некоторое количество воды, до этих пор связанное в составе гидратной оболочки зерна, таким образом повышая концентрацию свободных молекул воды в системе, которые могут быть задействованы в гидратации и растворении молекул ГЭЦ. Учитывая, что удельная поверхность цемента остается постоянной, можно ожидать, что и количество воды, которое может быть освобождено из состава гидратной оболочки при хемадсорбции молекул пластификатора на поверхность зерен, также конечно. При концентрациях пластификатора $\geq 0,06$ % достигается некоторое насыщение поверхности цементного зерна, после которого количество освободившейся воды меняется не так существенно.

Для реологической модели можно условно выделить три области: полностью изотропную область (концентрации ГЭЦ 0-0,200 % при любой концентрации пластификатора), двухфазную переходную область (концентрации ГЭЦ от 0,200-0,250 до 0,225-0,275 % в зависимости от концентрации пластификатора) и полностью анизотропную область (концентрации ГЭЦ 0,275-0,400 % при любой концентрации пластификатора), что четко коррелируется с результатами математического моделирования.

При концентрации пластификатора 0,3 % характерные максимум и минимум на графике не идентифицируются. Вероятно, это является следствием ощутимого уменьшения количества свободного растворителя – свободная вода становится задействованной в гидратации дополнительного количества молекул пластификатора, что не дает реализоваться снижению трения между слоями при растущей анизотропизации раствора за счет «смазывающего» эффекта прослойки воды. Плохая выраженность максимума и минимума на графиках для концентраций пластификатора 0-0,04 % вызвана той же причиной, правда в данном случае свободная вода задействована в формировании гидратных слоев на свободной от пластификатора поверхности зерен цемента.

С учетом этого замечания в интервале концентраций пластификатора 0,06-0,2 %, в пределах которого количество свободных молекул воды в системе, способных принять участие в гидратации и растворении молекул ГЭЦ, меняется незначительно, для реологической модели можно условно выделить три области с четкими границами: полностью изотропную область (концентрации ГЭЦ $< 0,250$ %), двухфазную переходную область появления и накопления жидкокристаллической фазы (0,250-0,275 %) и полностью анизотропную область (концентрации ГЭЦ $> 0,275$ %).

В интервале существования изотропного раствора ГЭЦ ($< 0,250$ %) пластическая вязкость системы не демонстрирует зависимость от концентрации пластификатора и остается примерно постоянной. В интервале существования раствора ГЭЦ в анизотропной форме ($> 0,275$ %) влияние пластификатора на вязкость системы уже существует и трудно поддается описанию.

Присутствие свободных, не ассоциированных с поверхностью цементного зерна, молекул пластификатора может вызывать усиление сетки зацеплений между движущимися слоями анизотропной фазы посредством формирования «мостиковой» связи опосредованной молекулой пластификатора, связанной одновременно с обоими слоями. Для реализации такой «мостиковой» связи один сегмент молекулы пластификатора должен образовать цепочку водородных связей с одним слоем анизотропной фазы, а другой ее сегмент – с вакантной областью другого слоя. При этом, чтобы одна молекула пластификатора оказалась ассоциированной одновременно с двумя разными слоями анизотропной фазы, необходимо соблюдение некоторых условий. Для возможности реализовать мостиковую связь необходимо, чтобы область потенциального закрепления в пределах другого слоя была еще не занята другой подобной молекулой пластификатора и находилась на доступном расстоянии.

Например, при увеличении концентрации пластификатора вероятность наличия вакантного для прикрепления участка в пределах другого слоя будет меньше. Поэтому мостиковая связь может быть реализована при концентрациях пластификатора, не превышающих некоторого критического значения. В области совсем малых концентраций такие связи также будут реализова-



ны, но в силу своей малочисленности не смогут быть идентифицированы по повышению вязкости системы. С другой стороны, при уменьшении расстояния между слоями анизотропной фазы (т.е. при увеличении концентрации ГЭЦ) такую связь реализовать проще, а, следовательно, это происходит при меньших концентрациях молекул пластификатора. Начиная с какого-то критического расстояния, образование подобных связей становится очень маловероятным.

Можно ожидать, что описанное усиление взаимодействия между слоями анизотропной фазы будет идентифицироваться в виде увеличения вязкости системы в достаточно узкой области концентраций, свободных от взаимодействия с цементом молекул пластификатора. С увеличением концентрации ГЭЦ такое увеличение вязкости будет происходить при меньших концентрациях пластификатора.

Поскольку расстояние между анизотропными слоями есть функция от концентрации ГЭЦ, то область существования мостиковых связей будет ограничена некоторым балансом концентраций ГЭЦ и свободных молекул пластификатора и может быть описана их соотношением, что объективно потребует дополнительных исследований, не входящих в круг задач настоящей работы.

С практической точки зрения больший интерес представляет интервал значений V , соответствующий первому классу ($V < 240$ мПа·с), поскольку отвечает требованиям большинства гидравлических программ по цементированию скважин. Ошибка прогноза составляет не более 9,5 мПа·с, что позволит весьма точно вычислять значения V^M по известным значениям P и Φ .

При этом необходимый интервал значений V может быть достигнут во всем диапазоне концентраций P при концентрациях Φ , не превышающих 0,225 %. Положительно, что при этом приходится иметь дело с тем интервалом концентраций Φ , в пределах которого существует только изотропный раствор ГЭЦ, когда пластическая вязкость системы не демонстрирует чувствительной зависимости от наличия P , что позволит для обеспечения необходимых значений параметра V относительно свободно и независимо варьировать концентрацию Φ .

При большем содержании Φ достигаемые значения пластической вязкости являются нежелательными или недопустимо высокими.

Заключение. Суммировав результаты моделирования с позиций применимости разработанных моделей, необходимо заметить, что перекрывающийся диапазон концентраций P и Φ в области рабочих значений параметров P и Φ (класс 1 в обоих случаях) достаточно широк, при наложении области требуемых значений параметра V он резко сокращается.

Расширение поля перекрывания диапазонов концентраций P и Φ в области рабочих значений сразу всех трех параметров (P , Φ и V) может быть достигнуто путем снижения степени полимеризации ГЭЦ, закладываемой в рецептуру. Несмотря на то, что особенности взаимодействия составляющих системы по объективным причинам должны сохраниться, потребуется корректировка моделей или, по крайней мере, уточнение границ выделенных классов.

Сопоставление результатов лабораторных исследований и математического моделирования основных технологических свойств с описанием физико-химических процессов, происходящих при затворении тампонажных составов в соответствии с разработанными рецептурами, а также предлагаемые методики анализа имеющихся данных, использованных для корреляционного и регрессионных анализов, анализ построенных многомерных статистических моделей как линейных, так и нелинейных, позволили количественно оценить влияние различных значений модифицирующих добавок P , Φ в рецептурах тампонажных растворов и их сочетаний на величины показателя фильтрации, растекаемости и пластической вязкости.

Построенные модели можно использовать при прогнозе значений Φ , P , V с учетом требований проектных документов, условий ведения работ по цементированию расчетных значений давлений ГРП и поглощения при разработке гидравлической программы по цементированию скважин. Модельные значения основных технологических свойств позволят снизить число вероятных значений концентраций модифицирующих добавок при разработке рецептур, что приведет к экономии времени и средств на этапе подготовительных работ к креплению обсадных колонн скважин.

Разработанные математические модели были использованы при оптимизации рецептур тампонажных составов для разработки программы работ по цементированию эксплуатационной ко-

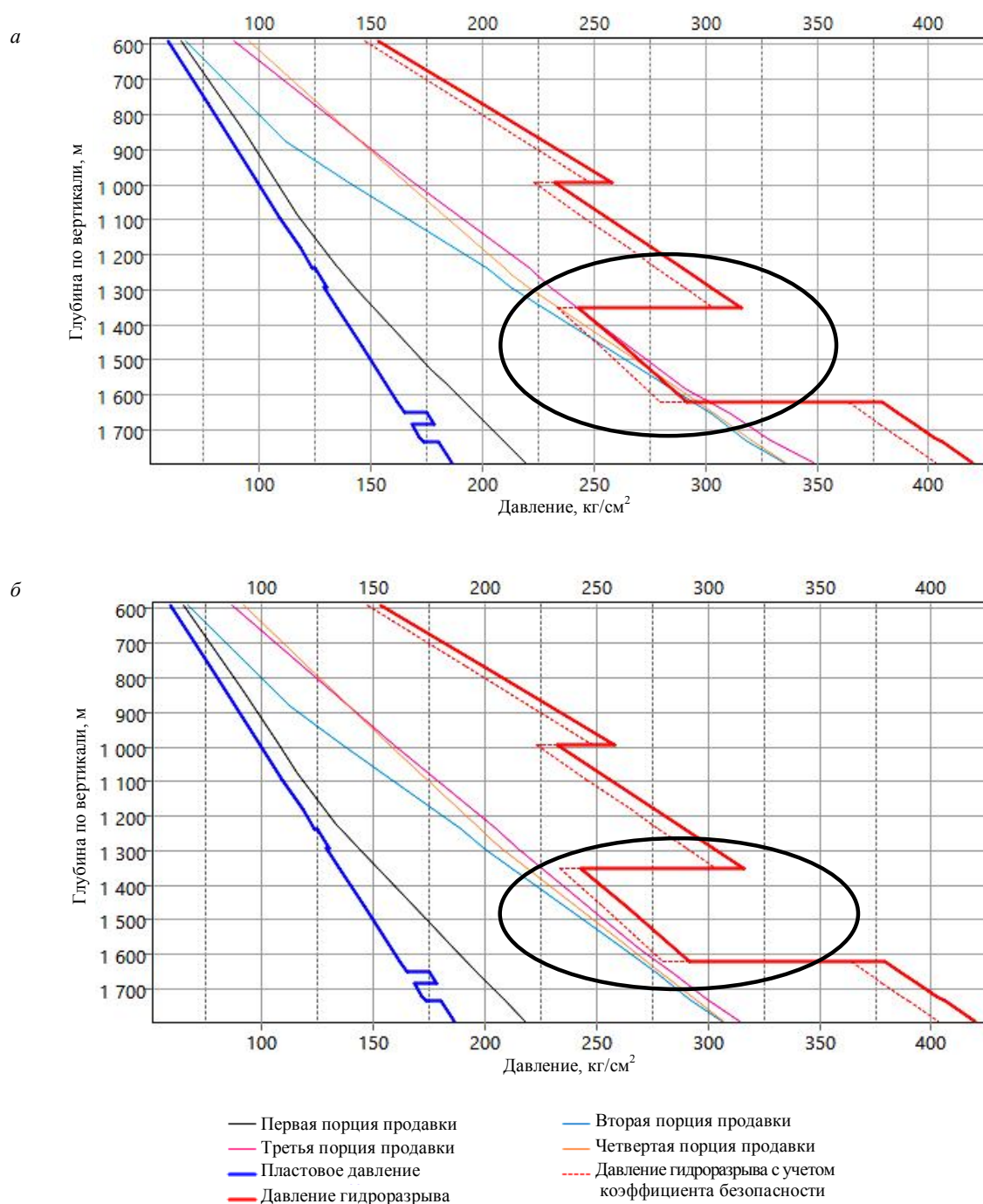


Рис.5. Расчет давлений в открытом стволе при закачке продавочной жидкости с учетом значений пластической вязкости тампонажного раствора, приготовленного по проектной рецептуре с вероятным ГРП (а), откорректированной модельной рецептуре без превышения давления ГРП (б)

лонны нефтедобывающей скважины на одном из месторождений Пермского края (рис.5). На основании проектной рецептуры был приготовлен тампонажный раствор, и оказалось, что полученные значения реологических свойств могут привести к возникновению гидроразрыва пород при реализации заданных режимов закачки и продавки тампонажного раствора (рис.5, а). Кроме того, значение показателя фильтрации оказалось выше требуемого.

С применением разработанных математических моделей была выполнена корректировка рецептуры тампонажного раствора. Фактически определенный показатель фильтрации тампонажного раствора, рецептура которого была оптимизирована на основе полученных модельных значений, не превышал требуемого проектного значения, а реологические свойства соответствовали



требованиям программы работ и исключали вероятность возникновения ГРП при продавке тампонажного раствора (рис.5, б).

Полученная на основе разработанных математических моделей рецептура рекомендована к применению. Лабораторный анализ тампонажного раствора показал соответствие модельных и фактических значений основных технологических свойств тампонажного раствора. Разница в значениях показателей моделируемых технологических свойств не превысила 3 %.

Полученные результаты позволили выявить особенности физико-химического взаимодействия рассматриваемых модифицирующих добавок и их взаимного влияния в составе базового тампонажного раствора и определить пределы их концентраций, при превышении которых управление основными технологическими свойствами получаемых тампонажных растворов невозможно или затруднительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агзамов Ф.А. Химия тампонажных и промывочных растворов / Ф.А.Агзамов, Б.С.Измухамбетов, Э.Ф.Токунова. М.: Недра, 2011. 245 с.
2. Бартенев Г.М. Физика полимеров / Г.М.Бартенев, С.Я.Френкель. Л.: Химия, 1990. 432 с.
3. Галкин В.И. Статистическое моделирование расширяющегося тампонажного состава / В.И.Галкин, А.А.Куницких // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. № 3. С. 215-244.
4. Литвиненко В.С. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами / В.С.Литвиненко, М.В.Двойников // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 24-29. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.24
5. Овчинников В.П. Физико-химические процессы твердения, работа в скважине и коррозия цементного камня / В.П.Овчинников, Н.А.Аксенова, П.В.Овчинников; Нефтегазовый университет. Тюмень, 2007. 369 с.
6. Перейма А.А. О влиянии химической обработки тампонажных растворов на эффективность действия расширяющих добавок / А.А.Перейма, Ю.С.Минченко, С.Г.Трусов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 5. С 2-7.
7. Петров В.С. Регулирование свойств тампонажного раствора – камня с помощью добавок аминотриэтилфосфонатов // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 46-59.
8. Чернышов С.Е. Совершенствование технологии строительства дополнительных стволов из ранее пробуренных скважин // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 22-24.
9. Чернышов С.Е. Влияние расширяющих добавок на свойства цементного раствора-каменя / С.Е.Чернышов, Т.Н.Крапивина // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. 2010. Т. 9. № 5. С. 31-33.
10. Чернышов С.Е. О совершенствовании технологии крепления эксплуатационных колонн на месторождениях Западной Сибири / С.Е.Чернышов, Н.И.Крысин, А.А.Куницких // Нефтяное хозяйство. 2011. № 10. С. 20-21.
11. Чернышов С.Е. Результаты внедрения инновационной технологии цементирования нефтяных скважин на месторождениях Казахстана / С.Е.Чернышов, Н.И.Крысин, А.А.Куницких // Нефтяное хозяйство. 2012. № 8. С. 108-110.
12. Чернышов С.Е. Исследование динамики гидратации и разработка составов расширяющих добавок к тампонажным растворам / С.Е.Чернышов, А.А.Куницких, М.В.Вотинов // Нефтяное хозяйство. 2015. № 8. С. 42-44.
13. Al Wahedi Yasser. Influence of classical and modern superplasticisers on the chemical and rheological behaviour of oil well cement: a comparative study / Al Wahedi Yasser, Ghada Bassioni, Jafar Awayes // Advances in Cement Research. 2011. Vol. 23. N 4. P. 175-184. DOI: 10.1680/adr.2011.23.4.175
14. A modified testing method for low density cement slurry / S.Zhang, Z.Li, X.Cheng, H.Luo, X.Guo // Drilling Fluid and Completion Fluid. 2014. № 31(3). P. 65-68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5620.2014.03.017
15. Chemical structure of cement aged at normal and elevated temperatures and pressures: Part I. Class G oilwell cement / G. Le Saout, E.Lécolier, A.Rivereau, H.Zanni // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. P. 71-78. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.09.018
16. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons, 2002. 656 p.
17. Domanska U. Experimental solid + liquid equilibria and excess molar volumes of alkanol + hexylamine mixtures: Analysis in terms of the ERAS, DISQUAC and Mod. UNIFAC models / U.Domanska, M.Goskowska // Fluid Phase Equilibria. 2004. Vol. 216. P. 135-145.
18. Rapid determination of complex oil well cement properties using mathematical models / Ghada Bassioni, Mohammed Mohammed Ali, Ali Almansoori, Gabriele Raudaschl-Sieber, Fritz E. Kühn // RSC Advances. 2017. Iss. 9. DOI: 10.1039/C6RA26045D
19. Hermans J. The viscosity of concentrated solutions of rigid rod-like molecules Poly (γ -benzyl-L-glutamate) in m-cresol // Colloid Sci. 1962. Vol. 17. № 7. P. 638-648.
20. Improving oil well cement slurry performance using hydroxypropylmethylcellulose polymer / G.Abbas, S.Irawan, S.Kumar, A.A.Elrayah // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 787. P. 222-227. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.787.222
21. Investigating rheological properties of high performance cement system for Oil wells / K.R.Memon, M.T.Shuker, S.Q.Tunio, A.A.Lashari, G.Abbas // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. № 6(20). P. 3865-3870.
22. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C₃A amounts / A.Zingg, F.Winnefeld, L.Holzer, J.Pakusch, S.Becker, R.Figi // Cement and Concrete Composition. 2009. Vol. 31. Iss. 3. P. 153-162. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.005



23. Li Y. Numerical Modelling of Cuttings Transport in Horizontal Wells Using Conventional Drilling Fluids / Y.Li, Nancy A. Bjorndalen, Ergun Kuru // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2007. Vol. 46. Iss. 7. DOI: 10.2118/07-07-TN
24. Plank J. Experimental determination of the effective anionic charge density of polycarboxylate superplasticizers in cement pore solution / J.Plank, B.Sachsenhauser // Cement and Concrete Research. 2009. Vol. 39. Iss. 1. P. 1-5. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.09.001
25. Robinson C. Liquid crystalline structure in polypeptide solutions / C.Robinson, J.C.Ward, R.B.Beevers // Disc. Faraday Soc. 1958. Vol. 25. P. 29-42.
26. Rocha S.A. An approach to calculate solid-liquid phase equilibrium for binary mixtures / S.A.Rocha, R.Guirardello // Fluid Phase Equilibria. 2009. Vol. 281. P. 12-21.
27. Roncero J. Study of the influence of superplasticizers on the hydration of cement paste using nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction techniques / J.Roncero, S.Valls, R.Gettu // Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32. P. 103-108. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00636-6
28. Structural Evolution of Liquid Crystalline Solutions of Hydroxypropyl Cellulose and Hydroxypropyl Cellulose – Based Nanocomposites during Flow / V.G.Kulichikhin, V.V.Makarova, M.Yu.Tolstykh, S.J.Picken, E.Mendes // Polym. Sci. A. 2011. Vol. 53. № 9. P. 748-764.
29. Technology for liner cementing in Well 1 of storage Bai-6, Bannan, Dagang / J.Jin, W.Xie, H.Zhang, G.Wang, Z.Zhou // Drilling Fluid and Completion Fluid. 2014. Vol. 31. N 6. P. 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5620.2014.06.016
30. Umeokafor C.V. Modeling of Cement Thickening Time at High Temperatures with Different Retarder Concentrations / C.V.Umeokafor, O.F.Joel. 2010. SPE-136973-MS. DOI: 10.2118/136973-MS

Авторы: **С.Е.Чернышов**, канд. техн. наук, доцент, nirgnf@bk.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), **В.И.Галкин**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, vgalkin@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), **З.В.Ульянова**, ст. преподаватель, z.v.uljanova@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), **Дэвид Ианн Макферсон Макдоналд**, профессор, d.macdonald@abdn.ac.uk (Абердинский университет, Абердин, Шотландия, Великобритания).

Статья поступила в редакцию 09.07.2019.

Статья принята к публикации 08.11.2019.