УДК 622.245

З.З. ШАРАФУТДИНОВ
ОАО «Гипротрубопровод»

СОЗДАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ

В создании безопасных условий бурения большую роль играют гидродинамические давления в скважине, которые определяются реологическими свойствами буровых растворов. Реологические свойства буровых растворов изучают с позиций классической механики. Подобный подход не предусматривает учета дискретности жидкости на уровне суспензии, строения жидкости и не рассматривает действие межмолекулярных сил, действующих в жидкости. Рассматриваются вопросы влияния состояния связей в воде на реологические свойства буровых растворов.

A significant part in creating safe drilling conditions is played by hydrodynamic pressures in well which are determined by rheological properties of drilling muds. Rheological properties of drilling fluids are studied from the standpoint of classical mechanics. This approach does not call for considering discreteness of liquid at the level of suspension and constitution of the liquid itself, nor does it consider the effect of intermolecular forces acting inside the liquid. The paper reviews the influence of the state of bonds in water on rheological properties of drilling fluids.

В процессе строительства скважин буровые растворы должны предотвращать возможные аварийные ситуации и технологические осложнения в процессе бурения, минимизировать загрязнение нефтегазонасыщенного пласта компонентами бурового раствора, а в строительстве подводных переходов обеспечивать безаварийное протаскивания трубопровода. Значительную роль в решении данных проблем играют реологические свойства буровых растворов, используемых в строительстве скважин.

Реологические свойства буровых растворов оказывают значительное влияние на создание гидродинамического давления в скважине. Гидродинамическое давление, в свою очередь, определяет возможность возникновения аварийных ситуаций и осложнений в процессе строительства скважин [2, 4, 5, 7, 9], приводящих к нарушению безопасных условий труда. Поэтому возникает задача управления реологическими характеристиками буровых растворов в скважине. Эта задача решается путем химической обработки буровых растворов различными полимерами [2, 4-6, 8, 10].

Наиболее общей моделью, описывающей поведение глинистых растворов на водной основе, является модель псевдопластической жидкости [10, 11]. Это обусловлено тем, что реологическая кривая буровых растворов линейна при $\gamma = 200\text{-}1000\ с^{-1}$, а с уменьшением γ искривляется. Поэтому для анализа и решения технических проблем, возникающих в процессе циркуляции буровых растворов в стволе скважины, буровые растворы целесообразно рассматривать как псевдопластические жидкости. Поведение псевдопластических жидкостей описывается уравнением Оствальда:

$$\tau = K\gamma^N, \qquad (1)$$

где τ – напряжение сдвига; K – показатель консистенции; γ – градиент скорости сдвига; N – показатель нелинейности.

Потери давления жидкости в процессе ее течения определяются выражением

$$P = \frac{4\tau L}{D}, \qquad (2)$$

где L – длина канала; D – размер канала.

Из анализа уравнений (1) и (2), а также результатов исследования процессов, происходящих при промывке скважины, опыта их строительства следует, что в качестве буровых растворов наиболее целесообразно использовать псевдопластические жидкости, обладающие величиной показателя нелинейности $N < 0,3$ [2, 4-6, 8].

В практической деятельности известна возможность получения псевдопластичных жидкостей с использованием биополимеров [4-6, 9]. Однако на сегодняшний день до сих пор не разработаны положения по управлению показателем нелинейности у буровых растворов с одновременным увеличением ассортимента используемых реагентов.

Данные ограничения, на наш взгляд, обусловлены следующим. Изучение свойств жидкостей и их аналитическое описание в процессе движения осуществляют с позиции классической механики сплошных сред [8, 10-12]. Используемый подход не предусматривает учета дискретности жидкостей на уровне суспензии и строения самой жидкости, а также не рассматривает свойства межчастичных сил, действующих в них.

Эти сложности предопределены недостаточными знаниями о структуре и природе свойств, проявляемых жидкостями, и тем, что не учитывается дискретность структуры рассматриваемых типов жидкостей. Например, буровой раствор дискретен как дисперсная система, состоящая из дисперсионной среды и дисперсной фазы. Дискретна также и дисперсионная среда – вода, которая в составе бурового раствора может проявлять свойства атомных, ионных, молекулярных и металлических веществ [1, 3, 7]. Все это накладывает отпечаток на поведение технологических жидкостей на водной основе.

Для создания безопасных реологических свойств буровых растворов необходимо рассмотреть действие реагентов, используемых для управления техническими параметрами буровых растворов и сопоставить их с природой раствора, формируемого ими.

Для исследований использовался 5-процентный глинистый раствор на основе бентонитового глинопорошка, натриевого монмориллонита, обладающего выходом раствора 18 $м^3$/тн. Испытывались следующие виды реагентов: карбоксиметилцеллюлоза CMC LV и HV; биополимер BARAZAN (XS – полимер), декстрин (DEXTRID); гидролизованный полиакриламид EZ MUD; полиакрилат натрия ИКПАН SL, ИКПАН R; полианионная целлюлоза PAC R и PAC L; лигносульфонат (КССБ-2); нитрилотриметилфосфоновая кислота (НТФ). Концентрация реагентов бралась в количестве, использующемся для управления техническими свойствами буровых растворов. Результаты измерений реологических параметров буровых растворов приведены в таблице.

Исследование реологических параметров полученных буровых растворов производилось с помощью вискозиметра Куэтта (реометр фирмы FANN, модель 286), предназначенного для одиночного или многоточечного измерения напряжения сдвига бурового раствора. Измерение напряжения сдвига бурового раствора осуществляли в диапазоне скоростей сдвига 5,11-511 $с^{-1}$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что на величину показателя нелинейности оказывают влияние состав и строение используемых реагентов, их молекулярная масса. Реагенты, обладающие малой молекулярной массой – CMC LV, PAC L, НИТРОН, а также EZ MUD обладали величиной нелинейности $N = 0,33$-$0,49$**,** кроме того, акриловые соединения обеспечивают буровым растворам близкие значения величин статического напряжения сдвига через одну и десять минут. Увеличение молекулярной массы у этих соединений приводит к снижению показателя нелинейности до $N = 0,22$-$0,3$. Реагенты КССБ-2 и нитрилотриметифосфоновая кислота (НТФ) привели к разрушению структуры исходного раствора, обеспечив величину $N = 0,52$-$0,57$. Иначе ведут себя реагенты DEXTRID и BARAZAN, которые обеспечивают получение растворов с величиной нелинейности $N = 0,26$-$0,3$. Повышение их концентрации в составе раствора приводит к снижению величины показателя нелинейности до 0,18-0,24.

Реологические показатели буровых растворов в зависимости от механизма растворения регентов в воде

Структуро-образователь	С, %	СНС*, дПа		K, Па·с$^{-N}$	N
		Через 1 мин	Через 10 мин		
Бентонит	5	7	10	3,57	0,47
КССБ-2	1	2	2	1,20	0,57
НТФ	0,15	0	0	1,91	0,52
CMC LV	0,35	7	15	11,88	0,41
CMC HV	0,15	15	18	43,08	0,28
CMC HV	0,25	20	24	56,63	0,28
PAC L	0,35	12	19	31,47	0,34
PAC R	0,15	12	19	75,07	0,24
PAC R	0,2	27	32	89,90	0,24
BARAZAN	0,05	8	15	32,00	0,30
BARAZAN	0,1	10	16	182,00	0,18
DEXTRID	0,7	10	15	27,00	0,29
DEXTRID	1,2	13	18	41,45	0,26
НИТРОН	4	7	8,5	43,50	0,49
ИКПАН SL	0,4	9	10	69,57	0,26
ИКПАН R	0,5	8	10	97,25	0,23
EZ MUD	0,05	11	12	41,26	0,35
Глицерин	1	7	10	16,22	0,30
Глицерин	5	7	10	22,40	0,30
Глицерин	10	8	12	15,60	0,30

*СНС – статическое напряжение сдвига

Рассмотрим величины реологических параметров, исходя из состояния связей в составе бурового раствора. Первоначально рассмотрим состояние воды в составе буровых растворов. Для любой системы, в том числе и буровых растворов, характерно единство дисперсионных, химических и электрических сил.

Вода и ее поведение в различных условиях. В природе вода проявляет свойства четырех крайних типов веществ: молекулярных, ионных, атомных, а при высоких давлениях и металлических. Проявление свойств того или иного вещества определяется превалирующим действием в ней тех или иных межчастичных сил [3, 7].

Жидкая вода делится на две части – полимерную и мономерную. У полимерной воды реализованы водородные, электрические и дисперсионные связи, а у мономерной – только дисперсионные силы. Поэтому энергия полимерной воды ниже мономерной, молекулы из полостей стремятся перейти в сетку, что и происходит при удобном случае. Однако при этом уменьшается степень заполнения полостей, и дисперсионные силы переводят эквивалентное количество воды из полимерного состояния в мономерное. В результате этой борьбы непрерывно происходит полимеризация и деполимеризация воды, что обуславливает ее текучесть, диффузию, электропроводность и все ее остальные свойства.

Особое место в свойствах, проявляемых водой, занимает поведение водородных связей. Водородная связь в воде способна дискретно изменять свое состояние от ионной до ковалентной. Состояние водородной связи определяется качеством наполнения ее внутренней структуры и природой образовавшего ее атома. Примером подобного поведения воды являются гидраты кремнезема, глинозема, газогидраты и т.п.

Состояние воды в присутствии реагентов. Реагенты, растворяемые в воде, создают в воде растворы замещения и растворы внедрения (соединения включения, клатраты, аддукты) [1, 7]. Соединения, формирующие растворы замещения, придают воде свойства ионно-молекулярного вещества. Раствор внедрения в воде представляет собой структуру, состоящую из полимеризованной воды и наполнителя ее структурных пустот. Растворы внедрения усиливают проявление у воды свойств атомного вещества.

Состояние воды в глинистом растворе. Вода в глине присутствует в мономерном и в двух полимерных состояниях – гидратном и гелевом [3]. Гидратная вода образовалась в результате заполнения мономерной водой гидросиликатной оболочки. Это способствовало первоначальному набуханию глины и гибридизации атома кислорода с образованием слоя гидратной (прочносвязанной, координационно-связанной) воды. Далее за счет вновь поступавших порций воды произошло формирование оболочки из молекул воды, скрепленных водородными связями, но обладающих меньшей прочностью, чем гидратная вода. Она была названа нами гелевой (рыхлосвязанной и др.), так как придает глинистой пасте свойства геля. Прочность гелевой сетки падает с отдалением от

гидратного слоя воды. Образование гелевой оболочки и различия в свойствах гидратной и гелевой воды обусловлено квантованием связи с элементами их образовавшими. Структура гидратной и гелевой воды наполнена своими мономерами, повышающими их устойчивость. В системе глина – вода всегда существует равновесие между различными формами воды, т.е. мономерами, гелевой и гидратной водой.

Действие реагентов на поведение глинистых растворов. Из природы растворения различных соединений в воде, их химического состава, а также из практики использования реагентов в составе буровых растворов можно выделить следующее. В качестве понизителей вязкости используют реагенты, гидратирующие и растворящиеся по электростатическому механизму с формированием раствора замещения и придания воде свойства ионно-молекулярного вещества [7].

Поэтому понизителями вязкости неминерализованного раствора являются соединения, способные за счет своей гидратации связать мономеры воды, содействуя тем самым их выходу из полостей полимеризованной воды. В результате этого происходит деформация водородных связей, т.е. придание им гибкости, что обеспечивает снижение вязкости буровых растворов. Понизителями вязкости минерализованных растворов в силу того, что вода в них обладает свойствами ионно-молекулярного вещества, будут соединения, придающие воде свойства атомного вещества, т.е. полимеризующие ее. Подобный эффект достижим при обработке солесодержащего раствора низкомолекулярными неэлектролитами, например многоатомными спиртами.

Соединения, способствующие дополнительной полимеризации воды и ее объемному структурированию, являются структурообразователями бурового раствора. Такая способность реагентов обусловлена следующим. Реагент-структурообразователь растворяется в воде под действием ненасыщенных электростатических сил. В последующем вода в составе раствора, агрегированная под действием электростатических сил, образует валентные связи по мере разворачивания макромолекулы полимера. Усиление действия валентных сил имеет место при заполнении внутренней структуры полимерной воды углеводородными фрагментами реагента. Таким образом, структурная прочность раствора определяется качеством заполнения внутренней структуры воды. В случае, когда реагент является хорошим заполнителем внутренних полостей воды, достигается значительное упрочнение водородных связей. Например, газогидраты [1, 15].

На основе предлагаемых представлений становится возможным рассмотреть действие известных реагентов на реологические параметры буровых растворов.

Увеличение показателя нелинейности буровых растворов показали соединения, которые придают воде свойства ионно-молекулярного вещества – КССБ, НТФ. Увеличение нелинейности раствора *N* проявилось у растворов, содержащих CMC LV, PAC L, НИТРОН, EZ MUD (см. таблицу). Это обусловлено большим различием в прочности связи в гидратной оболочке реагента и в объеме раствора. Гидратированные соединения в этом случае представляют собой отдельную фазу, аналогичную твердой фазе раствора. Такой раствор более похож на вязкопластичную жидкость и обладает показателем нелинейности более 0,3. Все эти соединения в составе раствора представляют собой дискретную систему, так как связи между ними и частицами глины менее прочны, чем связь с координированными ими молекулами воды.

Прочность водородных связей в объеме раствора распределена равномерно, что ведет к повышенной пластичности связей. В соответствии с этим раствор в процессе механического движения не нарушает своей микроструктуры за счет быстрого восстановления разрушенных связей. Такие реагенты придают раствору свойства псевдопластичных жидкостей с показателем нелинейности менее 0,3. Подобным образом проявили себя высокомолекулярные структурообразователи BARAZAN, CMC HV, PAC R, ИКПАН SL, ИКПАН SL, а также DEXTRID. Высокомолекулярные соединения из-за своего размера вносят более равномерные изменения в структуру воды по сравнению с низкомолекулярными аналогами и соответственно обеспечивают более

равномерное распределение прочности водородных связей по объему раствора.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что прочность структуры бурового раствора зависит от состояния воды в составе бурового раствора и распределения прочности водородных связей по объему раствора, а также от индукционного периода формирования водородных связей.

Из уточнения представлений о природе взаимодействия реагентов в объеме бурового раствора и приведенных экспериментальных результатов следует, что для получения псевдопластических жидкостей с показателем нелинейности $N < 0{,}3$ наиболее целесообразно использование неэлектролитов с высокой молекулярной массой или сочетанием реагентов с различным влиянием на структуру воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белоусов В.П.* Термодинамика водных растворов неэлектролитов / В.П.Белоусов, М.Ю.Попов. Л.: Химия, 1983.

2. *Булатов А.И.* Гидромеханика углубления и цементирования скважин / А.И.Булатов, Г.Г.Габузов. М., 1992. 368 с.

3. Гидратная полимеризация и формы проявления ее в горном деле / З.З.Шарафутдинов, Ф.А.Чегодаев, М.Р.Мавлютов // Горный вестник. 1998. № 4. С. 50-57.

4. *Грей Дж.Р.* Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. М.: Недра, 1985. 509 с.

5. *Дедусенко Г.Я.* Буровые растворы с малым содержанием твердой фазы / Г.Я.Дедусенко, В.И.Иванников, М.И.Липкес. М.: Недра, 1985. 230 с.

6. *Кистер Э.Г.* Химическая обработка буровых растворов. М.: Недра, 1972. 392 с.

7. *Краснов К.С.* Молекулы и химическая связь. М.: Высшая школа, 1984. 295 с.

8. *Маковей Н.* Гидравлика бурения. М.: Недра, 1986. 600 с.

9. О природе синергетических эффектов в полимер-глинистых буровых растворах. / О.А.Лушпеева, В.Н.Кошелев, Л.П.Вахрушев и др. // Нефтяное хозяйство. 2001. № 4. С. 22-24.

10. *Огибалов П.М.* Нестационарные движения вязкопластичных сред / П.М.Огибалов, А.Х.Мирзаджанзаде. М.: Изд-во МГУ, 1970. 415 с.

11. *Уилкинсон У.Л.* Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.

12. *Фридрихсберг Д.А.* Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984. 368 с.