

лоссальную величину (~ 10-16 см²), в результате чего происходит возбуждение водородной атмосферы, энергия которой передаётся ядерной подсистеме твёрдого сплава и его структура самоорганизуется. Однако для протекания процессов самоорганизации необходима большая плотность дефектов, которая и создаётся предварительным введением атомов водорода. При облучении твёрдого сплава или КАМ малыми дозами гамма-квантов в нём протекают цепные процессы аннигиляции дефектов, структура твёрдого сплава при этом переходит в более равновесное состояние по сравнению с исходным состоянием, повышаются адгезионные свойства зёрен. Выполняя полезную работу при выходе из образца, водород уменьшает количество трещин, пор, повышает пластичность, увеличивает эксплуатационную стойкость. Всё это в конечном итоге приводит к улучшению физико-механических характеристик твёрдого сплава и повышению работоспособности инструмента.

Особенно перспективным данное направление работы может оказаться при разработке технологии изготовления алмазного ПРИ, где повышение удерживающей способности матрицы по отношению к алмазным зёрнам имеет исключительно важное значение, так как оно является одним из главных факторов, определяющих качество композиционных алмазосодержащих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2101456 РФ на изобретение "Способ упрочнения твёрдосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород" /Рябчиков С. Я., Мамонтов А. П.- - 1998. – Бюл. № 1.
2. Рябчиков С. Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами // Техн. и технол. геол.-развед. работ (ВИЭМС).- 1993..- Вып. 1.- 37 с.
3. Рябчиков С. Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента. М.: ВИНТИ.- 1998.-80 с.
4. Чернов И. П., Мамонтов А. П., Батаки А. А. Аномальное воздействие малых доз ионизирующего излучения на металлы и сплавы / Атомная энергия.- 1984.- Том 57, вып. 1.- С.56-58.
5. Патент № 2092282 РФ на изобретение «Способ упрочнения твёрдосплавного инструмента» /Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Чернов И.П. – 1997. – Бюл. № 28

УДК 622.244.442.063

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПРОМЫВочНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Чубик П.С.

Начало исследованиям промывочных жидкостей в стенах ТПУ было положено автором в 1976 году. За прошедшую четверть века по этой тематике опубликовано более 100 работ, в том числе монография «Квалиметрия буровых промывочных жидкостей», 3 брошюры и 3 учебных пособия; получен десяток патентов на изобретения и выполнено такое же число хозяйственных и госбюджетных НИР; сделано более двадцати докладов на Международных, Всесоюзных и Всероссийских научных конференциях; защищена кандидатская (1987) и докторская (2000) диссертации; появились свои аспиранты и ученики – кандидаты наук (Годунов Е.Б., 1996). Все это вместе взятое принесло ТПУ определенную известность и в этой области научных исследований.

В данной статье рассматриваются основные результаты исследований промывочных жидкостей, полученные в последние годы.

Характерной чертой буровых работ является высокая капиталоемкость. В этой связи повышение их эффективности всегда было и сегодня остается весьма актуальной задачей.

Собственно бурение скважин заключается в разрушении горных пород на забое, удалении продуктов разрушения с забоя на поверхность, спуске и подъеме бурового снаряда. Самый распространенный способ удаления продуктов разрушения - гидравлический, который

осуществляется путем принудительной циркуляции в скважине жидкости, называемой промывочной. Однако роль промывочной жидкости не сводится только к удалению из скважины разрушенной породы. Как среда, в которой протекают практически все процессы, связанные с бурением скважин, она во многом определяет степень использования потенциальных возможностей и ресурс работы бурового оборудования и инструмента, механическую скорость бурения, вероятность возникновения различного рода осложнений, качество вскрытия продуктивных пластов, качество геологической и геофизической информации, затраты всех видов ресурсов и т.д. Поэтому не случайно промывочную жидкость образно называют кровью скважины.

В качестве промывочной жидкости чаще всего применяют глинистые суспензии, свойства которых регулируют с помощью различных химических реагентов. Общее число компонентов, используемых для приготовления и регулирования свойств промывочных жидкостей, чрезвычайно велико. Достаточно сказать, что в 1994 году для этих целей 98 фирм США выпускали компоненты 1900 наименований. Очевидно, что при столь широком ассортименте компонентов можно получить множество различных вариантов 2, 3, 4, 5 и т.д. - компонентных составов промывочных жидкостей, отличающихся хотя бы одним компонентом. Число же долевых составов при этом практически не ограничено.

Современные функции промывочных жидкостей и предъявляемые к ним требования приведены на рис. 1. Обязательность выполнения тех или иных из них определяется окружающей промывочную жидкость средой, моделью которой, в какой-то мере условно, могут служить геолого-технические условия бурения.

Для прямой или косвенной оценки только основных свойств промывочной жидкости используется множество различных показателей [6].

Многокомпонентность, многофункциональность, параметрическая сложность и многообразие геолого-технических условий бурения делают промывочную жидкость чрезвычайно сложной системой. Сложность ее обусловлена и другими факторами. В частности, наличие в составе промывочной жидкости химических реагентов делает ее химической продукцией, представляющей потенциальную опасность для окружающей природной среды (ОПС). Эта продукция к тому же имеет очень короткий «жизненный цикл», в конце которого она вместе с загрязненным ею шламом превращается в чуждые для ОПС отходы.

Анализ показывает, что факторы, определяющие формирование объемов основных отходов бурения, тесно связаны с функциональными свойствами промывочных жидкостей. Эти же свойства в значительной мере определяют и вероятность интоксикации промывочной жидкости в процессе бурения.

Таким образом, в данном случае подход к достижению технократических целей: бурить быстрее, лучше, дешевле и гуманистических целей: минимизировать объемы отходов и их экотоксичность, общий - повышение (оптимизация) качества промывочной жидкости.

К сожалению, при всей важности этой задачи многие предпосылки для хотя бы удовлетворительного ее решения пока отсутствуют. Так, о качестве промывочных жидкостей до сих пор судят по весьма ограниченному числу показателей: плотности, условной вязкости, показателю фильтрации, статическому напряжению сдвига и рН. При этом значения этих показателей нередко мало отличаются друг от друга. В таких ситуациях не остается ничего другого, кроме как выбирать самый дешевый состав без какой-либо уверенности в том, что в процессе бурения удастся избежать проблем.

Почему же, несмотря на реальное существование, из рассмотрения исключают показатели других, не менее важных свойств? Во-первых, это связано с отсутствием узаконенных методик их оценки. Во-вторых, большое число показателей плохо обозримо для того, чтобы по нему можно было сравнивать различные промывочные жидкости между собой и выбирать из них лучшую, а какой-либо иной процедуры выбора или селекции, кроме умозрительной, нет.

В результате данная область знания развивается преимущественно экстенсивно, т.е. через лавинообразное увеличение числа предлагаемых к использованию компонентных и долевых составов промывочных жидкостей, а не через целенаправленное повышение их качества на основе эффективного использования имеющихся материальных ресурсов.

В соответствии с Международным стандартом «качество - это совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагае-

Основные свойства промывочной жидкости	Функции промывочной жидкости и предъявляемые к ней требования	Номера свойств, определяющих выполнение промывочной жидкостью соответствующих функций и требований													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Плотность	Удаление с забоя частиц разрушенной породы (шлама)	+	+		+										
2. Реологические свойства	Транспортирование (вынос) шлама на поверхность	+	+							+					
3. Структурно-механические свойства	Охлаждение породоразрушающего инструмента	+	+								+			+	
4. Фильтрационно-коркообразующие свойства	Передача энергии от буровых насосов гидравлическим забойным двигателям	+	+												
5. Электрохимические свойства	Обеспечение устойчивости горных пород в околоствольном пространстве скважин	+	+	+	+	+	+	+	+		+			+	
6. Седиментационная устойчивость	Создание равновесия в системе «ствол скважины - пласт» (предупреждение поглощений и флюидопроявлений)	+	+	+	+		+								+
7. Ингибирующая способность	Удержание частиц шлама во взвешенном состоянии при остановках циркуляции	+	+	+											
8. Консолидирующая способность	Снижение сил трения между контактирующими в скважине поверхностями и их износа													+	+
9. Устойчивость к внешним воздействиям	Активизировать процесс разрушения горных пород на забое	+	+		+									+	
10. Теплофизические свойства	Не вызывать коррозии бурового оборудования и инструмента					+							+		
11. Коррозионная активность	Максимально сохранять естественную проницаемость продуктивных горизонтов (коллекторские свойства пород)	+	+	+	+	+					+			+	+
12. Поверхностное натяжение фильтрата (промывочной жидкости)	Не исказить геолого-геофизическую информацию				+	+									
13. Триботехнические свойства	Быть устойчивой к возмущающим воздействиям (к обогащению частицами разрушаемых пород, электролитной агрессии, высоким и низким температурам, действию бактерий и др.)	+	+	+		+		+		+	+				
14. Закупоривающая способность	Быть безопасной для обслуживающего персонала, экологичной и рентабельной	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Рис. 1. Свойства промывочной жидкости, обеспечивающие выполнение ею соответствующих функций и требований

мые потребности». Данное определение в полной мере относится и к промывочной жидкости, характеристиками которой являются значения показателей ее свойств.

Как уже отмечалось, совокупность показателей важнейших функциональных свойств слишком многочисленна и плохо обзрима для того, чтобы по ней можно было сравнивать различные промывочные жидкости между собой и выбирать из них наиболее предпочтительные. В связи с этим очевидна необходимость агрегирования отдельных показателей в один обобщенный показатель. Идеальным обобщенным показателем качества является отношение суммарного полезного эффекта от использования продукции по назначению к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию. Однако для промывочной жидкости величину суммарного полезного эффекта сложно определить даже по результатам ее использования по назначению. На стадии же проектирования, которая более чем на 70 % обеспечивает качество любой продукции, сделать это из-за отсутствия каких-либо формул, преобразующих качество в полезный эффект, невозможно.

По этой причине для оценки качества промывочных жидкостей и, соответственно, для оптимизации их составов, наиболее предпочтительным представляется использование обобщенной функции качества, формируемой как среднее геометрическое частных функций желательности значений показателей свойств

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_j \cdot \dots \cdot d_k)^{1/m},$$

где D - обобщенная функция (критерий оптимизации) качества промывочных жидкостей; $d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_m$ - частные функции желательности значений показателей $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ свойств промывочных жидкостей; m - число регламентируемых показателей свойств, т.е. показателей, на значения которых устанавливаются односторонние ($y_j < y_{\max}$ или $y_j > y_{\min}$) или двухсторонние ($y_{\min} < y_j < y_{\max}$) ограничения, где y_{\min}, y_{\max} - соответственно меньшее и большее значения j -го показателя в пределах, устанавливаемых нормативно-техническими документами, экспертами или лицами, принимающими решения.

Для нахождения частных функций желательности различных показателей, т.е. для приведения их к сопоставимому безразмерному виду, в бурении и многих других сферах человеческой деятельности весьма широко используют уравнения Харрингтона. Между тем автором установлено, что с использованием этих уравнений дать однозначную и объективную обобщенную оценку качества промывочных жидкостей невозможно [6]. Для обеспечения этой возможности разработан собственный алгоритм расчета частных функций желательности, который требует задать для каждого из регламентируемых показателей только два значения: наиболее предпочтительное (лучшее) и предельно допустимое (худшее).

При $y_j(\text{луч}) > y_j(\text{худ})$:

$$d(y_{ji}) = 0,2 [y_{ji} - y_j(\min)] / [y_j(\text{худ}) - y_j(\min)],$$

$$y_j(\min) < y_{ji} < y_j(\text{худ});$$

$$d(y_{ji}) = [0,8 y_{ji} + 0,2 y_{j1} - y_j(\text{худ})] / [y_{j1} - y_j(\text{худ})],$$

$$y_j(\text{худ}) < y_{ji} < y_{j1};$$

$$d(y_{ji}) = 1,$$

$$y_{j1} < y_{ji} < y_{j2};$$

$$d(y_{ji}) = 0,2 [(y_{ji} - y_j(\max))] / [y_{j2} - y_j(\max)],$$

$$y_{j2} < y_{ji} \leq y_j(\max).$$

При $y_j(\text{луч}) < y_j(\text{худ})$:

$$d(y_{ji}) = 0,2 [y_{ji} - y_j(\min)] / [y_{j1} - y_j(\min)],$$

$$y_j(\min) < y_{ji} < y_{j1};$$

$$d(y_{ji}) = 1,$$

$$y_{j1} < y_{ji} < y_{j2};$$

$$d(y_{ji}) = [0,8 y_{ji} + 0,2 y_j^2 - y_j(xуд)] / [y_j^2 - y_j(xуд)],$$

$$y_j^2 < y_{ji} < y_j(xуд);$$

$$d(y_{ji}) = 0,2[y_{ji} - y_j(max)] / [y_j(xуд) - y_j(max)],$$

$$y_j(xуд) < y_{ji} < y_j(max).$$

где y_{ji} - значение j -го показателя в i -м опыте (на i -м шаге расчета); $y_j(\text{луч})$, $y_j(\text{худ})$ - соответственно наиболее предпочтительное (лучшее) и предельно допустимое (худшее) значения j -го показателя; $y_j(\text{min})$, $y_j(\text{max})$ - соответственно минимальное и максимальное значения j -го показателя в пределах исследованной при проектировании промывочной жидкости области факторного пространства или установленные по соглашению; y_{j1} , y_{j2} - соответственно нижняя и верхняя границы диапазона, в пределах которого значения j -го показателя равнозначны лучшему значению - $y_j(\text{луч})$.

$$y_{j1} = y_j(\text{луч}) - 0,01 \cdot \Delta y_j |y_j(\text{луч}) - y_j(xуд)|;$$

$$y_{j2} = y_j(\text{луч}) + 0,01 \cdot \Delta y_j |y_j(\text{луч}) - y_j(xуд)|,$$

где Δy_{j1} , Δy_{j2} - величина шагов соответственно в меньшую и большую стороны от $y_j(\text{луч})$, определяющая диапазон, в пределах которого значения j -го показателя равнозначны $y_j(\text{луч})$, %.

Таким образом, обобщенная количественная оценка качества промывочной жидкости является относительной характеристикой, получаемой путем сравнения фактических значений показателей ее свойств с лучшим и худшим значениями. Очевидно, что эти значения должны регламентироваться нормативно-техническими документами. Однако разработка прогрессивных требований к значениям показателей как функциональных, так и экологических свойств промывочных жидкостей является достаточно сложной и пока не решенной задачей. Поэтому в настоящее время основой для регламентирования значений показателей свойств промывочных жидкостей служат не научно обоснованные стандарты, а, главным образом, практические рекомендации.

В создание предпосылок к переходу от рекомендательной к законодательной практике регламентирования значений ряда показателей, в частности, условной вязкости и показателя фильтрации, определенный вклад сделан и автором [6].

Особо следует отметить, что в рамках разработанной методологии отставание с переходом от рекомендательной практики регламентирования значений показателей свойств к законодательной препятствием для целенаправленного повышения качества промывочных жидкостей не является. Почему? Да потому, что при актуализации регламента на значения показателей свойств имеется возможность, о которой будет сказано ниже, оперативно пересмотреть все ранее принятые решения.

При бурении в осложненных условиях эффективность выполнения промывочной жидкостью требуемых функций, вероятность ее интоксикации и образования излишних объемов буровых отходов в значительной мере определяются реологическими и триботехническими свойствами, а также ингибирующей, консолидирующей и закупоривающей способностью.

Реологические свойства промывочных жидкостей оказывают доминирующее влияние на степень очистки забоя скважины от шлама, транспортирующую способность потока, величину гидравлических сопротивлений в циркуляционной системе скважины, амплитуду колебаний давления при выполнении спуско-подъемных операций, интенсивность обогащения промывочной жидкости шламом и др.

Перечень показателей, которыми характеризуют реологические свойства, определяет выбор реологической модели. В настоящее время в мировой буровой практике наиболее широко используемыми являются реологические модели Бингама - Шведова и Оствальда - де Ваале. Однако единый подход к выбору этих моделей и, следовательно, к выбору перечня показателей реологических свойств, отсутствует. Одни без каких-либо обоснований используют или модель Бингама - Шведова или модель Оствальда - де Ваале. Другие берут на вооружение ту из двух рассматриваемых моделей, которая более точно описывает реологическое поведение

ние исследуемой промысловой жидкости, хотя оно в зависимости от скорости сдвига и температуры в скважине может адекватно описываться то той, то другой моделью. Третьи одновременно оперируют показателями модели Бингама - Шведова и модели Оствальда - де Ваале. При этом кроме четырех основных показателей этих моделей широко используют и ряд дополнительных показателей: коэффициент пластичности, эффективную вязкость при скорости сдвига равной 100 с^{-1} , эффективную вязкость при полностью разрушенной структуре [7]. Вместе с тем очевидно, что одновременно контролировать и регулировать семь показателей только реологических свойств чрезвычайно затруднительно.

Таким образом, обоснование комплекса показателей, необходимых и достаточных для оценки качества промысловых жидкостей с позиций реологии, попрежнему остается актуальной задачей.

Известно, что в определенном диапазоне скоростей сдвига между параметрами реологических моделей Бингама - Шведова и Оствальда - де Ваале должна существовать функциональная связь

$$\begin{aligned} \eta &= k n \gamma_*^{n-1}; \\ \tau_0 &= (1 - n) k \gamma_*^n; \\ k &= (\tau_0 + \eta \gamma_*) \gamma_*^{-n}; \\ n &= \eta \gamma_* (\tau_0 + \eta \gamma_*)^{-1}, \end{aligned}$$

где γ_* - скорость сдвига, выше которой зависимость $\tau = \tau(\gamma)$ практически линейная.

Однако анализ как собственных, так и заимствованных результатов реометрии показал, что приведенные выше уравнения справедливы только при одной и строго определенной для каждого типа промысловой жидкости скорости сдвига.

В то же время результаты корреляционного анализа этих же данных (табл. 1) свидетельствуют о том, что между динамическим напряжением сдвига (τ_0) и эффективной вязкостью при скорости сдвига равной 100 с^{-1} (ЭВ_{100}), t_0 и показателем консистенции (k), коэффициентом пластичности ($KП$) и показателем неньютоновского поведения (n), пластической вязкостью (η) и эффективной вязкостью при полностью разрушенной структуре (ЭВ_{10000}) существует тесная линейная связь.

Таблица 1

Нормированная корреляционная матрица

Показатели	Значения коэффициентов парной корреляции						
	η	τ_0	КП	n	k	ЭВ_{100}	ЭВ_{10000}
η	1	0,698	-0,094	0,061	0,548	0,845	0,913
τ_0		1	0,623	-0,628	0,966	0,971	0,369
КП			1	-0,965	0,746	0,435	-0,446
n				1	-0,753	-0,458	0,445
k					1	0,904	0,190
ЭВ_{100}						1	0,567
ЭВ_{10000}							1

Поскольку любой из двух взаимокоррелируемых показателей может быть исключен из рассмотрения, то очевидно, что в данном случае оставшиеся после исключения показатели должны принадлежать одной реологической модели, число этих показателей должно быть минимальным, а их определение - по возможности оперативным, например, на реометрах с прямым отсчетом. Всем этим требованиям максимально удовлетворяет комплекс из трех по-

Таблица 2

Желательные пределы изменения значений основных показателей реологических свойств промысловых жидкостей

Оценка качества:	η , мПа·с	τ_0 , дПа	КП, с^{-1}
отлично	3 - 6	15 - 30	> 500
хорошо	6 - 10	20 - 50	350 - 500
удовлетворительно	10 - 15	20 - 50	200 - 350

казателей, включающий в себя пластическую вязкость, динамическое напряжение сдвига и коэффициент пластичности (табл. 2), которые и предлагается повсеместно использовать для характеристики реологических свойств промывочных жидкостей на водной основе.

Ингибирующей способностью промывочной жидкости называют ее способность предупредить или замедлять деформационные процессы в околоствольном пространстве скважин, представленном глинистыми и глиносодержащими породами. В связи со сложностью механизма взаимодействия этих пород с промывочной жидкостью единый показатель оценки ее ингибирующей способности до сих пор отсутствует. Ее характеризуют показателями, по меньшей мере, трех различных групп: набухания, влажности и деформации естественных и искусственных образцов глинистых пород, контактирующих с исследуемой средой [5].

Наибольшие перспективы повсеместного применения имеют показатели деформации, которые выгодно отличаются от показателей набухания и влажности не только экспрессностью определения, но и тем, что они являются функцией времени. Однако если говорить о коэффициенте устойчивости глинистых пород, являющемся главным из входящих в эту группу показателей, то следует признать его несостоятельность, поскольку значения этого коэффициента определяются величинами показателя фильтрации и статического напряжения сдвига промывочных жидкостей [5]. Между тем давно известно, что показатель фильтрации промывочной жидкости не может служить критерием оценки ее влияния на устойчивость стенок скважин в глинистых породах. Достаточно сказать, что специфические свойства глинистых пород обуславливают активное поступление в них свободной дисперсионной среды промывочной жидкости даже при отсутствии перепада давления в системе «ствол скважины - пласт», т.е. при отсутствии процесса фильтрации.

Таким образом, становится очевидным, что ингибирующую способность следует оценивать по разрушающему воздействию на глинистые породы свободной дисперсионной среды, т.е. фильтрата промывочной жидкости. Этот вывод и был положен в основу нового способа оценки ингибирующей способности промывочных жидкостей [11].

К сожалению, нарушения устойчивости стенок скважин приурочены не только к глинистым, но еще и к генетически слабосвязанным или тектонически разрушенным горным породам, в которые промывочная жидкость поступает практически беспрепятственно. Очевидно, что в таких случаях она должна обладать способностью хотя бы временно связывать, упрочнять и укреплять потенциально неустойчивые породы или, одним словом, консолидировать их. Суть запатентованной методики оценки консолидирующей способности промывочной жидкости [10] заключается в определении продолжительности нахождения в ней в устойчивом состоянии сконсолидированного ею же модельного образца потенциально неустойчивой породы.

Для оценки ингибирующей и консолидирующей способности промывочных жидкостей разработан прибор ПОИКС [1, 3], а для получения модельных образцов пород - специальный пресс [16]. Ингибирующую и консолидирующую способность промывочных жидкостей определяют на идентичных по составу, свойствам и размерам модельных образцах при одинаковой осевой нагрузке на них.

Кроме нарушений устойчивости стенок скважин, процесс бурения нередко осложняется и поглощением промывочной жидкости. Среди многочисленных способов изоляции каналов поглощения наиболее простым, доступным и достаточно высокоэффективным является их закупоривание вводимыми в промывочную жидкость наполнителями, например, резиновой крошкой, торфом, опилками и т.д. Ассортимент наполнителей достаточно широк: известно более 50 их наименований. Вместе с тем в отечественной практике этот способ ликвидации поглощения применяется лишь эпизодически. Основной причиной такого положения дел является отсутствие стандартной методики испытаний наполнителей, т.е. отсутствие возможности обоснованного выбора наиболее эффективного наполнителя и оптимальной концентрации его в промывочной жидкости для изоляции каналов поглощения с определенной удельной приемистостью.

В защищенной патентом методике ТПУ [12] критерием выбора наполнителя служит его концентрация, которая необходима и достаточна для полного закупоривания модельного образца поглощающего пласта без потерь промывочной жидкости. Для проведения испытаний наполнителей разработан целый ряд оригинальных приборов [6, 9, 15].

Триботехнические свойства характеризуют способность промывочной жидкости сни-

жать силу трения между контактирующими в ней поверхностями. Основным показателем триботехнических свойств является коэффициент триады трения «бурильные трубы - исследуемая промывочная жидкость - стенка ствола скважины», величину которого определяют с помощью специальных приборов - трибометров. Главным недостатком известных трибометров является то, что величина коэффициента трения оценивается не по прямым, а по косвенным показателям, точность определения которых зависит от целого ряда факторов, в частности, колебаний напряжения в сети, точности балансировки и т.д.

В трибометре конструкции ТПУ [14] коэффициент трения определяется непосредственно по величине силы трения. Кроме того, в нем более полно имитируются реальные скважинные условия, что в целом обеспечивает получение и реальных значений коэффициента трения.

Химически обработанная промывочная жидкость представляет для ОПС потенциальную опасность, масштабы и степень которой определяются объемом промывочной жидкости, поступающей в ОПС в процессе бурения скважин, объемом образующихся при их промывке отходов, размещаемых в ОПС по окончании буровых работ, а также экотоксичностью промывочной жидкости и указанных отходов.

Известны два пути решения экологических проблем, связанных с использованием промывочных жидкостей. Первый из них базируется на минимизации объемов буровых отходов и их экотоксичности, а второй, более радикальный, предусматривает применение экологически чистых промывочных жидкостей. Для реализации любого из этих путей нужно иметь возможность контроля экотоксичности промывочной жидкости на всех этапах ее «жизненного цикла». Прежде всего, это касается этапа разработки, поскольку анализ возможных причин интоксикации и детоксикации промывочной жидкости и разрушаемой при бурении горной породы свидетельствует о том, что сохранить начальный уровень экотоксичности промывочной жидкости в течение всего периода бурения скважины вполне реально.

В нашей стране о степени опасности для ОПС промывочных жидкостей и их отходов предлагается судить по кратности превышения содержания в них отдельных компонентов над установленной для каждого из этих компонентов предельно допустимой концентрацией. Однако применительно к промывочным жидкостям, которые, как правило, являются многокомпонентными, такой подход имеет ряд принципиальных недостатков.

Достаточно сказать, что он не учитывает того, что промывочная жидкость как всякая система обладает такими свойствами, которых нет и не может быть у составляющих ее частей. Иными словами, он не учитывает способности химических веществ в комбинациях и различных сочетаниях друг с другом усиливать или ослаблять вредное воздействие на объекты природной среды.

Анализ показывает, что наиболее реальным путем преодоления этого и других недостатков является переход на биотестирование непосредственно промывочных жидкостей. Суть биотестирования заключается в оценке суммарного действия содержащихся в исследуемых средах токсичных веществ на живые организмы, называемые тест-объектами.

В США постановление, предусматривающее проведение обязательного токсикологического биотестирования промывочных жидкостей и их компонентов, действует с 1985 года. При этом стандартным тест - объектом являются мизидовые креветки, продолжительность тестирования одной среды достигает 96 часов, а его стоимость - полтора тысяч долларов.

С целью многократного снижения затрат средств и времени на такого рода испытания автором была инициирована разработка не визуальной, как в США, а инструментальной методики токсикологического биотестирования на базе серийно выпускаемого отечественного прибора «Биотестер-2». Тест-объектом в этом приборе служат инфузории туфельки (*Paramecium caudatum*) - высокоорганизованные простейшие, которые сочетают в себе свойства отдельной клетки и целостного организма. Важно и то, что они являются наиболее широко распространенными обитателями пресноводных бассейнов - главных объектов негативного воздействия промывочных жидкостей.

В результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что в качестве тест - реакции необходимо использовать двигательную активность инфузорий в токсичной среде, измеряемую при таких концентрациях токсиканта, которые соответствуют стадии «угнетение», т.е. вызывают снижение их двигательной активности. В этом случае зависимость двигательной активности инфузорий от концентрации самых разных токсикантов

имеет явно выраженный линейный характер и выходит из начала координат.

Эти положения и составляют основу защищенной патентом методики биотестирования [13], в которой в качестве показателя, характеризующего экотоксичность исследуемой среды, используется коэффициент экотоксичности (K_T)

$$K_T = C_T / S_a,$$

где C_T - концентрация токсиканта во взвеси клеток тест-объекта, мг/л (млн^{-1}); S_a - степень снижения двигательной активности тест-объекта в исследуемой среде, %.

$$S_a = (1 - \Pi_T / \Pi_K) \cdot 100,$$

где Π_K - показания прибора для исходной взвеси клеток (контрольные), усл. ед.; Π_T - показания прибора при введении в исходную взвесь клеток токсиканта, усл. ед.

В табл. 3 показаны результаты токсикологического биотестирования некоторых химических реагентов, используемых для обработки промывочных жидкостей и имеющих нормированные значения ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. Эти результаты свидетельствуют о том, что при допустимой степени снижения двигательной активности, прини-

Таблица 3
Результаты токсикологического биотестирования химических реагентов

Название (марка) химического реагента (ХР)	Концентрация ХР во взвеси клеток C_T , мг/л	Степень снижения двигательной активности клеток S_a , %	Значение коэффициента экотоксичности K_T , (мг/л) / %	Среднее значение K_T , (мг/л) / %	ПДК ХР по результатам биотестирования, мг/л ($S_a = 20\%$)	ПДК ХР для рыбохозяйственных водоемов, мг/л
Сульфенол НП-3	0,10	40,16	$2,490 \cdot 10^{-3}$	$2,543 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,1
	0,12	47,00	$2,553 \cdot 10^{-3}$			
	0,20	77,37	$2,585 \cdot 10^{-3}$			
УЦР	10,00	46,00	$217,391 \cdot 10^{-3}$	$216,4 \cdot 10^{-3}$	4,33	3,7
	14,00	65,00	$215,385 \cdot 10^{-3}$			
КМЦ - 500	16,00	27,00	$592,593 \cdot 10^{-3}$	$618,3 \cdot 10^{-3}$	12,37	12,0
	24,00	38,20	$628,272 \cdot 10^{-3}$			
	40,00	63,10	$633,914 \cdot 10^{-3}$			

Таблица 4
Результаты токсикологического биотестирования промывочных жидкостей

Тип промывочной жидкости (ПЖ)	Концентрация ПЖ во взвеси клеток C_T , млн^{-1}	Степень снижения двигательной активности клеток S_a , %	Значение коэффициента экотоксичности K_T , (млн^{-1}) / %	Среднее значение K_T , (млн^{-1}) / %	ПДК ПЖ по результатам биотестирования, млн^{-1} ($S_a = 20\%$)	Необходимая кратность разбавления ПЖ
алюмофосфоновая	40000	12,13	3297,6	3297,6	65952	15
полимер-глинистая малосиликатная	40000	18,75	2133,3	2133,3	42666	23
	20000	60,00	666,7	680,6	13612	73
гуматная	40000	28,80	694,4	583,1	11612	86
	20000	68,60	578,0	580,5		
полимерная	40000	86,60	465,1	421,3	8426	119
	20000	49,00	408,2			
	10000	25,60	390,6			

маемой равной 20 %, ПДК исследованных химических реагентов, установленные путем биотестирования на инфузориях тифельки, близки к значениям ПДК, установленным Минздравом России.

В табл. 4 приведены результаты экотоксикологических исследований различных промывочных жидкостей. Из приведенных данных следует, что по величине коэффициента экотоксичности протестированные промывочные жидкости отличаются почти на порядок.

Разработанный в ТПУ биотест пригоден для оперативного нормирования ПДК и контроля экотоксичности не только отдельных химических реагентов, их композиций и промывочных жидкостей в целом, но и различных отходов бурения.

Об уровне экологической чистоты той или иной технологии промывки скважин предлагается судить по величине отношения суммы ущерба, причиняемого ОПС основными отходами бурения, к номинальному плановому объему горной породы, разрушаемой в процессе бурения [8]

$$K_{эТ} = \text{argmin} (Y / V_{п}^н),$$

где $K_{эТ}$ - критерий, характеризующий уровень экотехнологии промывки скважин, руб/м³; $V_{п}^н$ - номинальный плановый объем горной породы, разрушаемой в процессе бурения, м³; Y - ущерб, причиняемый окружающей природной среде (ОПС) основными отходами бурения, руб.

$$V_{п}^н = 0,785 \left[\sum_{i=1}^m D_{нi}^2 L_{нi} - \sum_{j=1}^k D_{кj}^2 L_{кj} \right],$$

где m - число интервалов скважины, разбуриваемых породоразрушающим инструментом (ПРИ) разного диаметра; $D_{нi}$ - диаметр ПРИ в i -ом интервале бурения, м; $L_{нi}$ - длина i -го интервала бурения, м; k - число интервалов отбора керна разного диаметра; $D_{кj}$ - диаметр керна на j -ом интервале кернаотбора, м; $L_{кj}$ - длина j -го интервала кернаотбора, м.

$$Y = \Pi_{уд} \left\{ \sum_{i=1}^n V_i \cdot \text{ЭТ}_i (\text{ЭТ}_i / \text{ЭТ}_н)^a \right\} \cdot (V_{ф}^{\text{ОПЖ}} / V_{н}^{\text{ПЖ}})^b \cdot (V_{ф}^{\text{РГП}} / V_{п}^н)^c,$$

где $\Pi_{уд}$ - плата за размещение в ОПС 1м³ отходов бурения с соответствующей нормой экотоксичностью, руб; n - число отдельно собранных компонентов отходов бурения; V_i - фактический объем i -го компонента отходов, м³; ЭТ_i - фактическая экотоксичность i -го компонента отходов бурения, усл.ед.; $\text{ЭТ}_н$ - нормируемая начальная экотоксичность исходной ПЖ, усл.ед.; $V_{ф}^{\text{ОПЖ}}$ - фактический объем отходов ОПЖ, м³; $V_{н}^{\text{ПЖ}}$ - номинальный потребный объем ПЖ, м³; $V_{ф}^{\text{РГП}}$ - фактический объем отходов извлеченной из горного массива разрушенной породы, м³; a, b, c - коэффициенты, характеризующие влияние превышения норм соответственно экотоксичности, объема отходов ОПЖ и объема отходов РГП на общий ущерб, наносимый ОПС.

Анализ влияния различных факторов на формирование объема основных отходов бурения свидетельствует о том, что предлагаемая концепция может быть положена в основу не только оценки уровня экотехнологии промывки скважин, но и буровых работ в целом, поскольку она прямо или косвенно охватывает практически все составляющие оценки их эффективности.

Выбор оптимальных составов промывочных жидкостей для тех или иных геолого-технических условий бурения представляет собой весьма сложную задачу. Известно, что для решения этой задачи каждый из возможных компонентных составов промывочной жидкости должен иметь техническую характеристику. Таковой может служить набор экспериментальных данных о долевых составах и соответствующих им значениях показателей свойств, либо совокупность математических моделей показателей свойств. Учитывая многовариантность компонентных составов чрезвычайно важно, чтобы число опытов, необходимое для получения технической характеристики промывочной жидкости, было минимальным.

Выполнить это требование можно только с использованием активных экспериментов,

из которых для проектирования промывочных жидкостей обычно применяют эксперименты, спланированные по методу комбинационных квадратов [2]. Применение этого метода позволяет получать нелинейные модели показателей свойств, для построения которых используют метод Брандона. Существенным недостатком метода Брандона является необходимость многократной трансформации массива экспериментальных данных, что существенно увеличивает трудоемкость их обработки, процедуру которой к тому же трудно формализовать. Автором разработан собственный метод получения нелинейных моделей, который в отличие от метода Брандона, какой-либо трансформации массива исходных данных не требует. При этом математические модели показателей свойств не только менее громоздки, но и более точны [6].

Накопленный опыт свидетельствует, что по предложенному автором методу нелинейные модели показателей свойств промывочных жидкостей можно получать без особого труда. В то же время нельзя не признать, что представление технических характеристик промывочных жидкостей не только в виде совокупности моделей показателей свойств, но и в виде матриц планирования с результатами опытов, выполненных по методу комбинационных квадратов, не носит массового характера. Это скорее исключение, чем правило.

Единственной объективной причиной такого положения дел является чрезвычайно высокая трудоемкость экспериментов, обусловленная необходимостью выполнения большого числа опытов. Кардинально же уменьшить число опытов, можно лишь ориентируясь на получение линейных моделей. Сравнительный анализ точности нелинейных и линейных моделей показателей свойств промывочных жидкостей свидетельствует о том, что использование последних является вполне допустимым для решения большинства практических задач.

Автором разработаны насыщенные матрицы планирования эксперимента, которые обеспечивают предельно возможную минимизацию числа опытов: их лишь на единицу больше числа факторов (табл. 5). Отличительной особенностью насыщенных матриц является и то, что они обеспечивают получение линейных моделей, связывающих входные факторы и выходные параметры функционально.

Таблица 5

Насыщенная матрица планирования опытов для 4 факторов

Номера опытов	Уровни факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1	1	1	1
2	1	3	3	2
3	2	3	1	3
4	3	3	2	1
5	3	1	3	3

При выборе оптимальных составов по строкам технической характеристики промывочной жидкости число принципиально возможных оптимальных решений равно числу опытов. Вместе с тем очевидно, что в исследованной при проектировании данной промывочной жидкости области факторного пространства число возможных решений или долевых составов практически неограниченно.

Нами разработан оригинальный алгоритм [6], который позволяет осуществлять поиск оптимальных составов в исследованном факторном пространстве, оперируя не математическими моделями показателей свойств, а техническими характеристиками промывочных жидкостей в табличном виде. О допустимости принятой в данном алгоритме линейной зависимости точек внутри исследованного факторного пространства от его опорных вершин, т.е. реальных опытов, свидетельствует то, что средняя относительная ошибка прогноза значений показателей свойств промывочных жидкостей не превышает 8 % (табл. 6).

В целом для решения рассматриваемой оптимизационной задачи достаточно указать лишь лучшее и худшее значения всех регламентируемых показателей и в исследованном факторном пространстве определить точку, которой соответствует максимум обобщенной функции качества.

Если же необходим самый дешевый и при этом достаточно качественный состав, то в околооптимальной области значений обобщенной функции качества определяют точку, кото-

рой соответствует минимум стоимости 1 м³ промывочной жидкости. Эта задача точно также, но последовательно, решается и в многоальтернативной ситуации, когда оптимальный состав для заданного регламента на значения общих показателей свойств выбирается из двух или большего числа технических характеристик промывочных жидкостей.

Таблица 6

Результаты оценки погрешности прогноза значений показателей свойств промывочных жидкостей с помощью АРМ «Раствор»

Состав промывочной жидкости, кг/м ³	ПБН - 207,5		ПБН - 182,5		ПБН - 210	
	КМЦ - 4,3		КМЦ - 5,5		КМЦ - 4,6	
	АКК - 5,1		КССБ - 30		АКК - 2	
	НТФ - 2,9		Са(ОН) - 2,7		НТФ - 3,6	
	NaOH - 2,7		Са(SO) ₂ · 2 Н О - 4,5		NaOH - 3,7	
Показатели свойств:	Значения показателей свойств					
	<i>факт</i>	<i>прогноз</i>	<i>факт</i>	<i>прогноз</i>	<i>факт</i>	<i>прогноз</i>
ρ, кг/м ³	1110	1123	1125	1126	1130	1128
УВ, с	34,3	36,5	35,3	33,7	35,9	36,5
п, мПа·с	12,4	11,4	10,3	11,1	13,1	14,0
τ, дПа	32,4	29,0	28,0	30,3	30,4	31,5
Ф, см ³ /30 мин	7,2	7,6	7,0	6,2	7,0	6,7
δ, мм	2,1	2,3	2,6	2,7	1,8	1,9
pH	7,65	7,99	10,6	10,7	9,1	8,98
УЭС, Ом·м	1,28	1,25	0,30	0,34	1,37	1,25
Ис	14,7	13,0	6,1	5,4	12,2	12,7
Кс, мин	28,5	28,0	10,5	8,4	33,6	27,0
ц	0,25	0,28	0,20	0,22	0,26	0,30
	δ _{ср} = 6,6 %		δ _{ср} = 6,6 %		δ _{ср} = 8,0 %	

Данный алгоритм положен в основу автоматизированного рабочего места (АРМ) «Раствор» [4, 6]. Оно предназначено для формирования и постоянного пополнения компьютерного банка технических характеристик промывочных жидкостей и оперативного выбора из него оптимальных составов по задаваемым пользователями технологически необходимым значениям показателей свойств.

АРМ «Раствор» обеспечивает оперативный поиск оптимальных решений при любых изменениях перечня и числа анализируемых промывочных жидкостей, стоимости компонентов, перечня и числа регламентируемых показателей, а также желательных пределов их варьирования. В процессе бурения пользователь может осуществлять выбор оптимальных составов с учетом наличия химических реагентов и добавок, а также оперативно пересматривать ранее принятые решения, меняя регламент на значения показателей свойств промывочных жидкостей в соответствии с изменениями геолого-технических условий бурения или в связи с его актуализацией.

В свою очередь, возможность оперативного выбора оптимальных составов из множества вариантов при различных регламентах на значения показателей свойств позволяет объективно оценивать достигнутый уровень разработки промывочных жидкостей, определять направления совершенствования их качества и, самое главное, уже на стадии проектирования предупреждать возможные проблемы в процессе бурения.

Таким образом, в результате выполненных исследований создана методология целенаправленного повышения качества промывочных жидкостей, обеспечивающая реальную возможность перехода от экстенсивного к интенсивному развитию этой области знания и значительного ускорения научно-технического прогресса в области бурения скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог нефтегазового оборудования, производимого предприятиями Томской области / Под ред. В.Г.Лукьянова, В.Г.Креца. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. - 152 с.
2. Нейштетер И.А., Чубик П.С. Методы планирования экспериментов при поиске опти-

мальных условий в разведочном бурении. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 98 с.

3. Чубик П.С., Брылин В.И., Годунов Е.Б. Приборно-методический комплекс для проектирования буровых растворов применительно к сложным геолого-техническим условиям бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - М., 1998. - № 6. - С. 16-20.

4. Чубик П.С., Вылегжанин О.Н., Глинкин В.В. Автоматизированный выбор оптимальных составов буровых растворов // Нефтегазовые технологии. - М., 1998. - № 4. - С. 15 - 17.

5. Чубик П.С., Годунов Е.Б., Брылин В.И. Методика выбора промывочных жидкостей для бурения скважин в глинистых и глиносодержащих породах // Геология и разведка. - М., 1998. - № 5. - С. 109 - 118.

6. Чубик П.С. Квалиметрия буровых промывочных жидкостей. - Томск: Изд-во НТЛ, 1999. - 300 с.

7. Чубик П.С. Методика комплексной инженерной реометрии буровых растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - М., 1997. - № 5. - С. 12 - 15.

8. Чубик П.С. Основы экотехнологии промывки скважин // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности / Сб. Трудов ОАО «НПФ «Геофит» ВНК. - Томск: Изд-во ТГУ, 2000. - С. 205 - 212.

9. Способ определения закупоривающей способности промывочной жидкости и устройство для его осуществления: А.с. 1835503 СССР, МКИ5 G 01 N 15/08 / Брылин В.И., Чубик П.С., Годунов Е.Б.; Томский политехн. ун - т. - № 4921396 / 25; Заявл. 28.03.91; Оpubл. 28.08.93, Бюл. № 31.

10. Способ определения влияния бурового раствора на консолидацию горных пород: Пат. 2073841 РФ, МКИ6 G 01 N 3/00 / Чубик П.С., Брылин В.И., Годунов Е.Б.; Томский политехн. ун - т. - № 5056883 / 28; Заявл. 28.07.92; Оpubл. 20.02.97, Бюл. № 5.

11. Способ определения влияния бурового раствора на разупрочнение глинистых и глиносодержащих пород: Пат. 2073227 РФ, МКИ6 G 01 N 3/00 / Чубик П.С., Брылин В.И., Годунов Е.Б.; Томский политехн. ун - т. - № 93028581 / 28; Заявл. 26.05.93; Оpubл. 10.02.97, Бюл. № 4.

12. Способ определения закупоривающей способности бурового раствора с наполнителем: Пат. 2062452 РФ, МКИ6 G 01 N 15/08 / Чубик П.С., Брылин В.И., Годунов Е.Б.; Томский политехн. ун - т. - № 94011407 / 25; Заявл. 01.04.94; Оpubл. 20.06.96, Бюл. № 17.

13. Способ определения токсичности химических веществ в водной среде: Пат. 2112977 РФ, МКИ6 G 01 N 33/18 / Чубик П.С., Нечаева Л.Н., Брылин В.И.; Томский политехн. ун-т. - № 96111278 / 13; Заявл. 04.07.96; Оpubл. 10.06.98, Бюл. № 16.

14. Устройство для определения смазочной способности промывочной жидкости: Пат. 2044301 РФ, МКИ6 G 01 N 19/02 / Чубик П.С., Брылин В.И.; Томский политехн. ун - т. - № 5006929 / 28; Заявл. 22.07.91; Оpubл. 20.09.95, Бюл. № 26.

15. Устройство для определения закупоривающей способности бурового раствора с наполнителем: Свид-во 1147 РФ на пол. модель, МКИ6 G 01 N 15/08 / Чубик П.С., Брылин В.И., Годунов Е.Б.; Томский политехн. ун - т. - № 94011408 / 25; Заявл. 01.04.94; Оpubл. 16.11.95, Бюл. № 11.

16. Устройство для формирования модельных образцов: Свид-во 2307 РФ на пол. модель, МКИ6 G 01 N 1/28 / Чубик П.С., Брылин В.И.; Томский политехн. ун-т. - № 5106518/20; Заявл. 24.04.95; Оpubл. 16.06.96, Бюл. № 6.