

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВСПЕНЕННОГО ТАМПОНАЖНОГО РАСТВОРА

Gefei Liu, Pegasus Vertex, Inc.

ВВЕДЕНИЕ

Многие скважины бурят в районах, где слабые зоны не могут выдерживать давления столба цементного раствора нормальной плотности больше 15 фунт/галл (1797 кг/м³). В этих случаях необходимо применять системы цементных растворов малой плотности, которые снижают гидростатическое давление столба жидкости во время закачки цементного раствора.

Для уменьшения плотности цементного раствора до 11,5 фунт/галл (1378 кг/м³) используют такие легковесные добавки, как бентонит и гильсонит. Применение газонаполненных пуццолановых шариков или полых микросфер может еще больше снизить плотность цементного раствора до 7,5 фунт/галл (898,7 кг/м³).

Еще одним способом уменьшения плотности цементного раствора является его смешение со вспенивающими агентами и газом (обычно азотом). В этом случае плотность вспененного цементного раствора можно довести до 8 фунт/галл (958,6 кг/м³) и при этом добиться вполне приемлемых прочностных характеристик затвердевшего цементного раствора.

Вспененный цементный раствор давно считается решением проблемы эффективного тампонирувания зон поглощения. Итак, почему он не становится очевидным выбором многих компаний.

Ответ следующий. Хотя у вспененного цементного раствора есть многочисленные проверенные в лаборатории преимущества, отсутствие у компаний возможности взять пробу на поверхности в качестве явного свидетельства успешности цементирования приводит к тому, что они должны полагаться на теорию расчета процесса цементирования со вспененным раствором, координацию расходов различных жидкостей во время цементирования и на еще только развивающиеся методы контроля качества цементирования со вспененным раствором, указывающие на то, успешно ли они провели цементирование.

Хотя моделирование типовых процессов цементирования широко распространено, расчет процесса цементирования со вспененным раствором требует громоздких вычислений для учета влияния

давления и температуры на сжимаемую жидкость. Раньше расчет обычно проводили исходя из профиля гидростатического давления в скважине в конце операции, а основными параметрами были число ступеней и относительное содержание азота. Однако чтобы полностью оценить изменение гидравлической характеристики вспененного цементного раствора в зависимости от температуры и давления в разные периоды вычислений, требуется программа численного моделирования.

Ниже перечислены некоторые технические проблемы для цементировочных работ со вспененным раствором:

- сжимаемость вспененного цементного раствора;
- зависимость свойств от температуры и давления;
- реологические свойства вспененного раствора;
- многоступенчатое изменение содержания азота;
- скважины с большим отходом забоя от вертикали, горизонтальные скважины;
- сходимость численных расчетов.

Программы моделирования можно применять для следующих целей:

- оптимизация скоростей нагнетания для максимальной эффективности вытеснения бурового раствора путем расчета максимально допустимых скоростей нагнетания без превышения давления гидроразрыва пластов;
- расчет эквивалентной плотности циркуляции в любом месте скважины в любой конкретный момент времени в ходе процесса, даже при свободном падении, когда в скважине вакуум и давление на устье равно нулю;
- быстрый расчет и анализ процесса цементирования. Оптимизация относительного содержания азота.

Функция расчета и моделирования процесса цементирования с применением вспененного раствора теперь имеется в программе моделирования CEMPRO+ компании PVI. Программа включает не только статическую математическую модель, но и обеспечивает динамическое моделирование режима течения в скважине. Проводится анализ результатов статического расчета и фактически-

го конечного положения вспененного цементного раствора. Оптимального расчета с необходимыми профилями давления и плотности и во время циркуляции, и после закачки можно добиться путем тщательного планирования параметров расчета, включая плотность исходного раствора, содержание азота, число ступеней и противодействие.

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

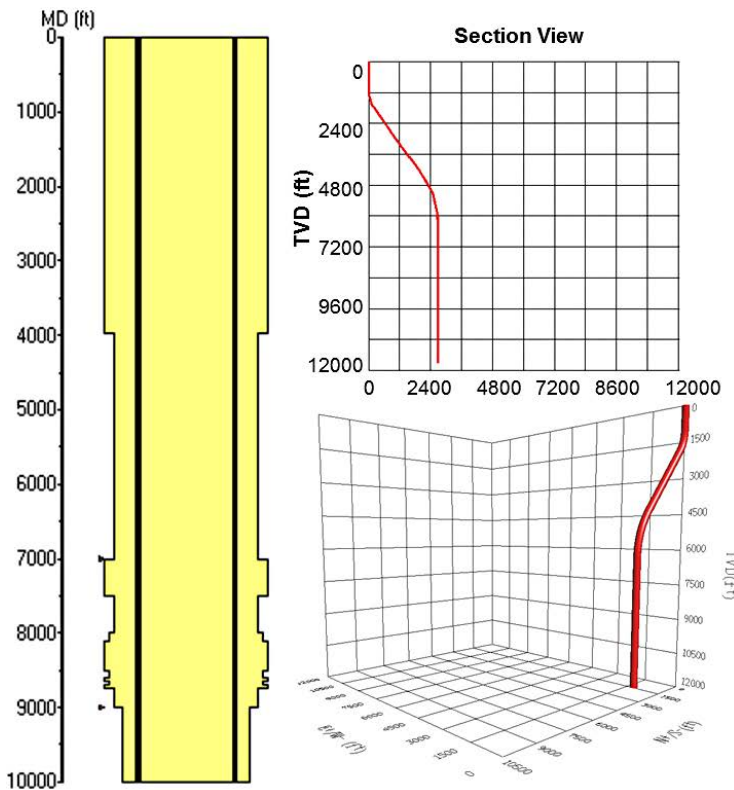
Процесс цементирования предусматривает введение в определенный объем исходного цементного раствора известного количества азота и вспенивающего агента. Во время вытеснения (бурового раствора) вспененный цементный раствор нагнетают вниз обсадной колонны, и он поступает в конечное место в кольцевом пространстве (за обсадной колонной). По всему пути потока непрерывно изменяется давление и температура. Рост температуры в скважине приводит к расширению газовой фазы раствора, тогда как возрастание давления сжимает ее. Такие параметры вспененного цементного раствора, как плотность, вязкость, объем и расход, изменяются в зависимости от положения и условий в скважине. Сжимаемый цементный раствор обладает динамическими свойствами, отличными от тех, которые ожидаются в лаборатории. Вообще, введение азота увеличивает вязкость раствора, что зависит от качества пены (содержания газа в пене в объемных процентах).

Компьютерное моделирование процесса цементирования обычно позволяет решать вопросы, связанные с давлением нагнетания и необходимой мощностью, эффективностью вытеснения (бурового раствора), эквивалентной плотностью циркуляции в рассматриваемых зонах, профилем динамического давления в кольцевом пространстве и т.д. В случае цементирования со вспененным раствором необходимо дополнительно учитывать следующее:

- плотность вспененного цементного раствора;
- эквивалентная скорость нагнетания;
- качество пены;
- увязывание гидростатического давления и потерь давления на трение;
- конечное положение жидкостей.

Технология цементировочных работ со вспененным раствором опирается на расчет плотности этого раствора, исходя из давления и температуры в скважине. Плотность цементного раствора в любой точке скважины зависит от давления, действующего на раствор, температуры в этой точке скважины, объема исходного раствора и содержания азота.

Перед проведением цементирования можно рассчитать необходимое содержание азота, исходя из требуемого конечного положения жидкостей и плотности вспененного раствора, или же на основе таких методов, как постоянный расход азота, постоянная плотность раствора или их комбинация (сочетание).



Well location: Offshore with riser

Air gap (ft)	Water depth (ft)	Riser ID (in)
40.0	3500.0	16.000

Cased hole

#	Description	ID (in)	Top (ft)	Shoe (ft)
1	Previous	14.000	3983.3	7000.0

Open hole

#	Description	ID (in)	Bottom MD (ft)
1	Open hole	16.000	7500.0
2	Wash out	14.000	8000.0
3		15.000	8100.0
4		16.000	8500.0
5		15.000	8600.0
6		16.000	8649.9
7		15.000	8700.1
8		16.000	8750.0
9		14.000	9000.0
1		12.500	10000.0

Pipe:

#	Description	OD (in)	ID (in)	Length (ft)
1	Casing	9.800	9.000	10000.0

Fluid properties

#	Fluid	Density (ppg)	Model	PV (cP)	YP (lbf/100ft ²)
1	Mud	9.40	BP	10.0	5.0
2	Cement	13.20	BP	18.0	8.0
3	Displacem	8.80	BP	10.0	5.0

Рис. 1. Конфигурация ствола скважина и данные о жидкостях

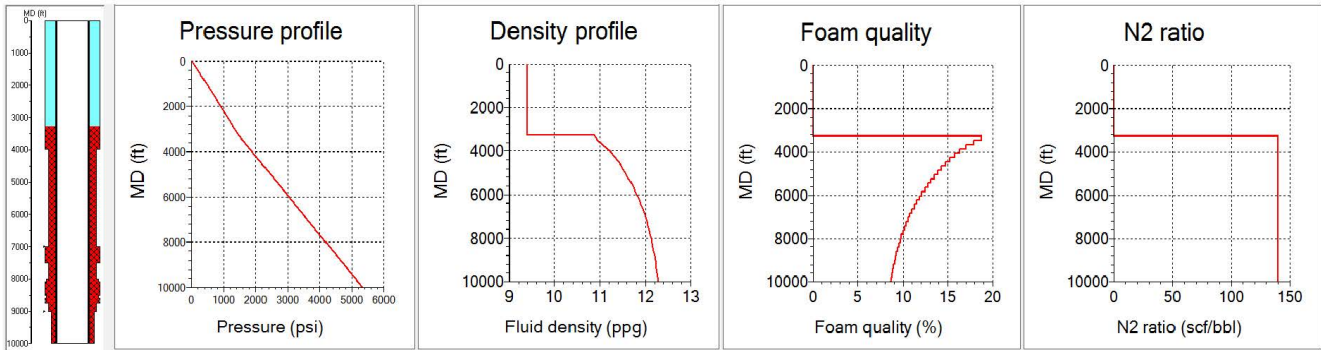


Рис. 2. Метод расчета – постоянное содержание азота

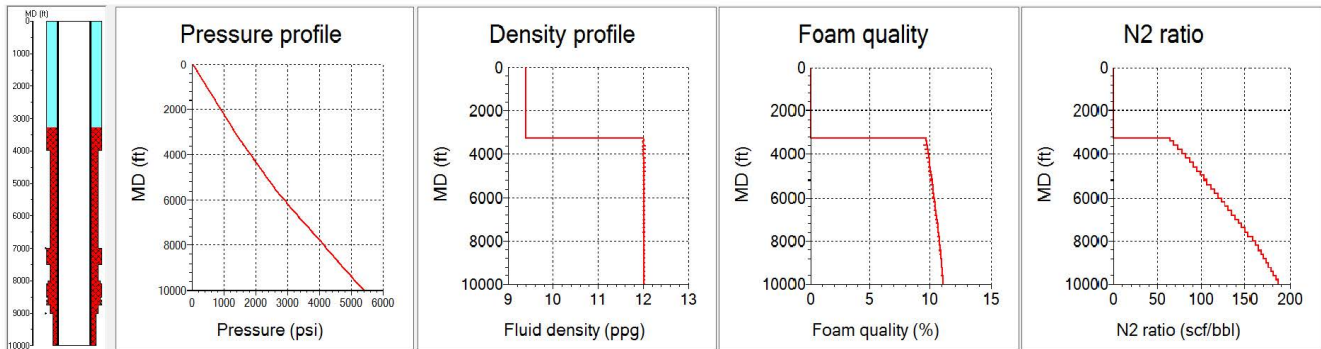


Рис. 3. Метод расчета – постоянная плотность раствора

Постоянное содержание азота. Расход азота остается постоянным в течение всего процесса цементирования. Следовательно, плотность цементного раствора будет возрастать с глубиной. Из-за изменения плотности столба раствора порой сложно решить проблему контроля за скважиной в верхней части столба и разрыв пласта в нижней части столба.

Постоянная плотность раствора. Этот метод требует увеличения расхода азота по мере нагнетания цементного раствора в скважину. В результате, плотность столба раствора постоянна сверху донизу. В промышленной практике расход азота увеличивают ступенями для каждых 300–2000 фут цементного раствора, в результате чего плотность столба раствора имеет ступенчатый характер.

Данный метод более популярен для первичного цементирования.

ТИПИЧНЫЙ ПРИМЕР

Для иллюстрации компьютерного моделирования процесса цементирования со вспененным раствором используем следующий пример (рис. 1).

Цель – путем газирования азотом снизить плотность цементного раствора с его исходного значения 13,2 фунт/галл (1581,6 кг/м³) до 12 фунт/галл (1440 кг/м³). Это необходимо, чтобы высота подъема вспененного цементного раствора достигла отметки 3280 фут (1000 м) от поверхности.

Вариант 1: Метод расчета – постоянное содержание азота. Используя вышеприведенные данные и данный метод расчета, мы запустили программу SEMPRO+ и получили следующие результаты (рис. 2).

На рис. 2 показаны профили давления, плотности раствора, качества пены и соответствующее содержание азота. Ввиду постоянного содержания азота мы видим широкий диапазон изменения плотности раствора и качества пены, как и следовало ожидать. Иногда широкий диапазон изменения качества пены может приводить к появлению неустойчивой пены в верхней части интервала. Достоинством данного метода является простота его применения на промысле: требуется лишь постоянное содержание азота.

Вариант 2: Метод расчета – постоянная плотность раствора. Если мы уменьшаем интервал пены до 328 фут (100 м), получаем очень равномерное распределение профилей плотности раствора и качества пены. Это характеризует метод постоянной плотности раствора. Правда, в этом случае требуется 21 ступень изменения содержания азота, как показано на рис. 3.

Вариант 3: Метод расчета – комбинированный метод. Теперь мы увеличиваем подачу азота ступенями на каждые 1312 фут (400 м) цементного раствора в кольцевом пространстве. Это существенно улучшает профили, при этом профили плотности

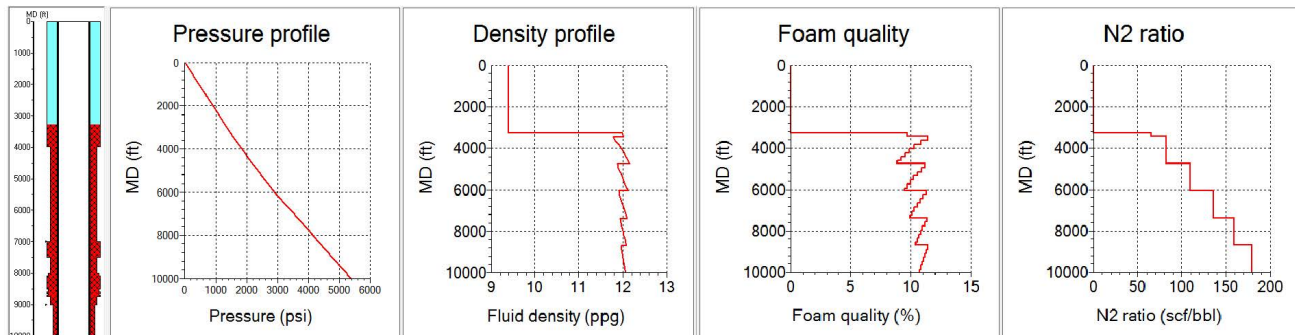


Рис. 4. Метод расчета – комбинированный метод

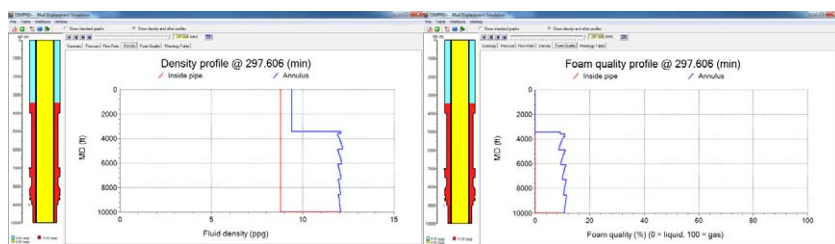


Рис. 5. Динамическое моделирование – профили плотности раствора и качества пены

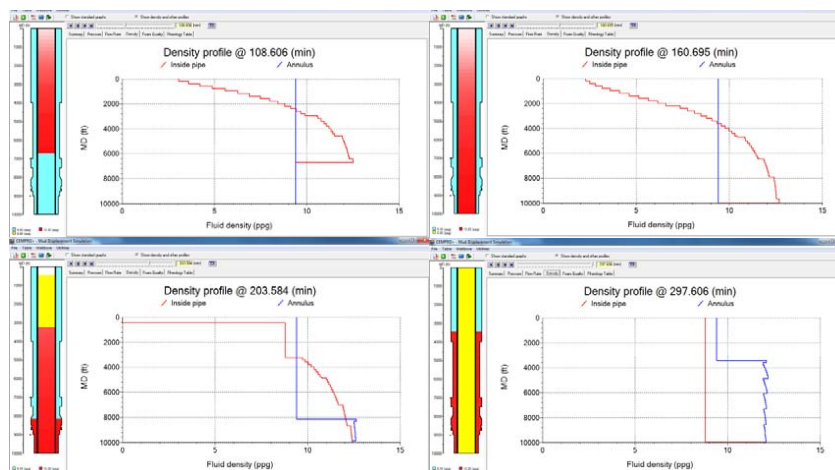


Рис. 6. Динамическое моделирование – профили плотности

раствора и качества пены достаточно равномерные. Рис. 4 показывает, что такой процесс требует шести ступеней изменения содержания азота.

Вариант 4: Динамическое моделирование. Результаты комбинированного метода используются в качестве основы для сравнения статического метода расчета и динамического моделирования.

Затем рассчитанные в комбинированном методе значения содержания азота используются в качестве исходных данных для динамического моделирования. На рис. 5 показаны конечное положение жидкостей и профили плотности раствора и качества пены.

Озадачивает следующее. Если использовать значения содержания азота, вычисленные с помощью

указанного метода расчета, и выполнить моделирование процесса вытеснения, конечное положение жидкостей отличается от расчетной величины. В нашем случае конечное положение вспененного цементного раствора равно 3434 фут (1046,8 м), а не 3280 фут (1000 м) по расчету.

Расчет необходимого содержания азота и объема исходного раствора не учитывает потерь давления на трение, сжатие и расширение вспененного цементного раствора, которое он претерпевает в процессе вытеснения бурового раствора.

Однако в процессе вытеснения вспененный цементный раствор сначала необходимо закачивать в обсадную колонну. Прежде чем он поступает в кольцевое пространство, он подвергается гидростатическому давлению находящихся там не вспененных жидкостей.

В зависимости от расхода и плотности жидкостей, их конечное положение отличается от значений, вычисленных с помощью (статического) метода расчета. Иными словами, конечное положение жидкостей, профили плотности раствора и качества пены зависят от пути потока.

На рис. 6 показаны динамические профили плотности жидкости по мере поступления вспененного цементного раствора из обсадной колонны в кольцевое пространство. Отметим, что плотность раствора и качество пены непрерывно изменяются, так как вспененный раствор претерпевает сжатие в скважине. Меняющаяся интенсивность красного цвета отражает разное содержание азота во вспененном растворе, обусловленное совместным действием следующих факторов:

- многоступенчатое изменение расхода азота при закачке.
- возрастание давления с глубиной.
- рост температуры.

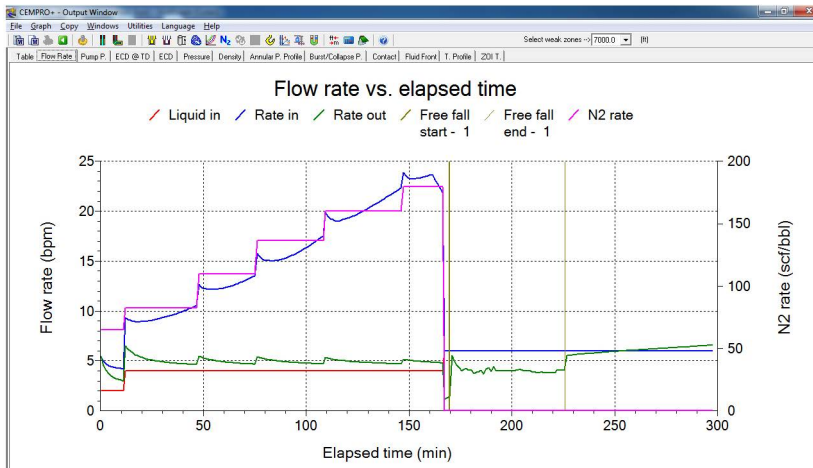


Рис. 7. Динамическое моделирование – значения расхода

В отличие от традиционного цементирования, когда расход во всей системе постоянен в любой данный момент, расход вспененного цементного раствора непостоянен. На расход вспененного раствора в скважине влияет фактическая скорость нагнетания, содержание азота и предшествующие стадии нагнетания. Для получения объемного расхода по всему пути потока используют численные методы.

Рис. 7 иллюстрирует значения расхода в точках наблюдений в процессе цементирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вспененный цементный раствор часто считают альтернативой традиционному цементному раствору, когда требуется меньшая плотность раствора и небольшая прочность на сжатие затвердевшего цемента. Впервые вспененный цементный раствор применили в начале 80-ых годов. Несмотря на многочисленные научно-исследовательские программы изучения динамических явлений, связанных со сжимаемыми газированными азотом жидкостями,

наши представления остаются неполными в связи со следующими проблемами:

Несовпадение лабораторных и скважинных условий. Легко измерить свойства вспененного цементного раствора в лаборатории, но такие свойства, как пористость, проницаемость и прочность (затвердевшего) цемента меняются после закачки раствора в скважину. Пока сложно оценить, что происходит с цементным раствором по мере его продвижения в скважину и кольцевое пространство.

Делаются попытки получать и исследовать образцы получаемого на месторождении вспененного цементного раствора с помощью специально сконструированного манифольда отбора проб.

Возможность моделирования. Характер вспененного цементного раствора очень затрудняет расчет поведения сжимаемой жидкости. Сначала необходимо рассчитать динамический профиль температуры, а затем использовать его для вычисления скорректированного качества пены. Для вспененного раствора также необходимо учитывать потери давления на трение.

Новая компьютерная программа CEMPRO + позволяет решать вопросы и расчета и моделирования процесса цементирования со вспененным раствором. В программу заложен современный алгоритм, позволяющий работать с 12 жидкостями (каждую жидкость можно газировать азотом до 50 ступеней), учитывать обратную циркуляцию и т.д.

Применение компьютерной программы расчета и анализа процесса цементирования до начала работ оказалось эффективным способом повышения качества и успешности первичного цементирования, особенно при расчете и проведении цементирования со вспененным раствором.

RETROBRAS: ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОДАЖИ КОМПАНИИ MITSUI & CO ДОЛИ ГАЗОПРОВОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Компания Petroleo Brasileiro (Petrobras) готовит отчуждение доли в 49% пакета акций газопроводной инфраструктуры компании.

Стратегическим покупателем может выступить компания Mitsui & Co, которая уже заключала соглашения о сотрудничестве с бразильской нефтяной государственной корпорацией.

В настоящее время переговоры между бразильской и японской сторонами находятся на предварительном этапе. Отметим, что компании Petrobras принадлежит 9 тыс. км газопроводов.

Напомним, что Petroleo Brasileiro может продать 14 млрд долл. США своих активов, чтобы выйти на достаточный уровень с целью финансирования поставленных перед

государственной корпорацией инвестиционных целей.

Убытки государственной компании Бразилии за 2014 г. составили 7,174 млрд долл. США.

Компания потеряла 2,05 млрд долл. США в связи с коррупционными схемами, действовавшими на уровне руководства, а также 14,8 млрд долл. США из-за девальвации активов компании.