

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН****СУЛЕЙМЕНОВА Р.А., АПЕНДИНА А.К.***Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова*

Аннотация: В данной статье рассмотрено повышение качества цементирования скважин на основе всестороннего обзора научных основ, технических соображений и рабочих процедур, связанных с процессами, известными как цементирование. Было выяснено, что химические добавки и различные техники цементирования могут увеличить качество цементного раствора на необходимую глубину при различных показателях температуры и давления. Высокая прочность на сжатие и обеспечение полной зональной изоляции оказывает благоприятное воздействие на создание гидравлического уплотнения между обсадной колонной и цементом и дальнейшую работу скважины, а наличие широкого выбора техник цементирования значительно улучшает диапазон необходимых качеств цементного камня. Добавки, входящие в состав цементного раствора, также играют большую роль в оптимизации процесса цементирования и подбираются индивидуально.

Ключевые слова: цементирование скважин, химические добавки, температура, давление, обсадная колонна, прочность на сжатие, зональная изоляция, время отвердевания, качество цементирования

**JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF CEMENT
SLURRIES TO IMPROVE THE QUALITY OF CEMENTING OF OIL WELLS**

Abstract: This article discusses improving the quality of well cementing based on a comprehensive review of the scientific fundamentals, engineering considerations, and operational procedures associated with the processes collectively known as cementing. It was found that chemical additives and various cementing techniques can increase the quality of the cement slurry to the required depth at various temperature and pressure indicators. High compressive strength and full zonal isolation have a beneficial effect on the creation of a hydraulic seal between the casing and cement and the further operation of the well, and the wide selection of cementing techniques significantly improves the range of required qualities of cement stone. The additives included in the cement slurry also play a large role in optimizing the cementing process and are selected individually.

Key words: well cementing, chemical additives, temperature, pressure, casing, compressive strength, zonal isolation, thickening time, free fluid cement quality

**МҮНАЙ ҰҢҒЫМАЛАРЫН ЦЕМЕНТТЕУ САПАСЫН ЖАҚСARTУ ҮШІН
ЦЕМЕНТ ЕРІТІНДІЛЕРІНІҢ ҚҰРАМЫН НЕГІЗДЕУ ЖӘНЕ ДАМУ**

Аңдатпа: Бұл мақалада ғылыми негіздерді, техникалық ой-пікірлерді және цементтеу деп аталатын процестерге қатысты жұмыс процедураларын жан-жақты қарастыру барысында ұңғымаларды цементтеу сапасын жақсарту туралы айтылады. Химиялық қоспалар мен цементтеудің әртүрлі әдістері әрқелкі температура мен қысым индикаторларында цемент шламының сапасын қажетті тереңдікке дейін арттыра алатындығы анықталды. Жоғары қысу беріктігі және толық аймақтық

оқшаулау корпус пен цемент арасындағы гидравликалық тығыздаудың пайда болуына және ұңғыманың одан әрі жұмыс істеуіне оң әсер етеді, цементтеу техникасының кең таңдауы цемент тасының қажетті сапаларының ауқымын едәуір жақсартады. Цемент ерітіндісіне қосылған қоспалар цементтеу процесін оңтайландыруда үлкен рөл атқарады және жеке таңдалады.

Түйінді сөздер: ұңғыманы цементтеу, химиялық қоспалар, температура, қысым, корпус, қысу беріктігі, аймақтық оқшаулау, қатаю уақыты, цемент сапасы

Введение

Нефтедобывающая промышленность переместилась из легкодоступной в область, представляющую сложность в плане глубины, давления, толщины слоя воды и свойств пород. Одним из наиболее ответственных этапов является разобщение пластов скважины, от качества выполнения которого в значительной степени зависит успешное строительство скважины. Под разобщением пластов понимается комплекс процессов и операций, проводимых для закачки тампонажного раствора в затрубное пространство с целью создания там надежной изоляции в виде плотного материала, образующегося со временем в результате отверждения тампонажного раствора. Поскольку в качестве тампонажного наиболее широко применяется цементный раствор, то и для обозначения работ по разобщению используется термин «цементирование».

Анализ литературных источников и промыслового материала показывает, что до настоящего времени, несмотря на совершенствование технологических процессов и технических средств, все еще высок процент скважин с заколонными проявлениями и межпластовыми перетоками. Основными причинами этих осложнений являются флюидопроводящие каналы, возникающие в твердеющем тампонажном растворе в период формирования цементного камня, и микрозазоры между цементным камнем и поверхностью обсадных труб (рис.1).

Проектирование рецептуры цемента осуществляется на основании параметров скважины, включающих динамическую и статическую температуры на забое скважины, поровое давление, градиент гидроразрыва. Также необходимо знать о наличии осложнений в скважине, таких как обвалы ствола



Рис.1 – Микрозазоры цементного камня

скважины и интервалы с потенциальным поглощением, активные водоносные пласты и пласты с потенциальными нефте- и газопроявлениями. Немаловажно понимать, как конкретная скважина будет в дальнейшем использоваться, имея в виду различные технологии заканчивания на этапе ее эксплуатации. Все вышеизложенные факторы в совокупности с опытом цементирования на конкретном месторождении или участке позволяют оптимально подобрать необходимые свойства цементного раствора и цементного камня. Для измерения и подбора свойств цемента используется современное лабораторное оборудование, которое сертифицировано по стандартам ISO 10426 и ANSI/API10. Производятся лабораторные испытания для определения реологических свойств растворов, времени загустевания, фильтрационных характеристик, прочности цементного камня, а также пластических, расширяющих, самозаживляющих и газоблокирующих свойств цемента.

Цементирование – сложный процесс, требующий применения специализированной техники. Однако это не говорит о том что провести его самостоятельно невозможно. Выбрав и правильно приготовив тампонаж-

ный раствор можно достигнуть наилучших результатов повышения качества цементного камня.

Целью исследования является именно повышение качества цементирования скважин на основе всестороннего обзора научных основ, технических соображений и рабочих процедур, связанных с процессами, известными как цементирование.

Актуальность статьи заключается в непрерывном увеличении добычи нефти и газа, что возможно только при условии выполнения значительных объемов буровых работ. Из общей суммы капитальных вложений в нефтяную промышленность большая часть средств расходуется именно на буровые работы. В этих условиях особое значение приобретает эффективность проведения заключительных этапов строительства скважин. В частности, некачественное цементирование может не только существенно снизить эффективность работ по бурению скважины в целом, но и вообще сделать бессмысленным сам факт ее сооружения.

Теоретическая часть

Цементирование скважин – это процесс размещения цементного раствора в скважину для достижения нескольких целей, включая цементирование обсадных труб и хвостовиков, размещение цементировочных пробок и выполнение исправительного цементирования.



Рис.2 – Образец портландцемента

Центральной объединяющей темой данной отрасли выделяется портландцементу

(рис.2). Физические и химические свойства и характеристики этого замечательного материала имеют решающее значение для каждого аспекта технологии цементирования скважин. Скважинное цементирование подвергает портландцемент условиям, значительно отличающимся от ожидаемых его изобретателем. Цементные системы должны быть спроектированы для размещения в условиях, варьирующихся от ниже нуля в зонах вечной мерзлоты до более 1000°F [538°C] в некоторых скважинах с термическим восстановлением. После размещения цементные системы должны сохранять свою целостность и обеспечивать зональную изоляцию в течение срока службы скважины. Стало возможным приспособить такой широкий спектр условий благодаря разработке добавок, которые модифицируют поведение портландцементов для индивидуальных требований к скважинам.

Цементные добавки позволяют приспособиться к широкому диапазону условий. Добавки изменяют поведение цементной системы, идеально допуская успешное размещение раствора между обсадной колонной и пластом, быстрое развитие прочности на сжатие и адекватную зональную изоляцию в течение срока службы скважины. Сегодня доступно более 100 добавок для скважинных цементов, многие из которых могут поставляться в твердой или жидкой форме. Существует восемь основных категорий добавок.

Ниже рассмотрены классы добавок, влияющих на стабильность и качество цементного раствора.

Пеногасители

Многие цементные добавки могут вызвать вспенивание раствора во время смешивания (рис.3). Чрезмерное вспенивание раствора может иметь несколько нежелательных последствий. Это может привести к гелеобразованию взвеси и потере гидравлического давления во время перекачки из-за кавитации в смесительной системе. Кроме того, захват воздуха может вызвать более высокую, чем хотелось бы, плотность суспензии. Пеногасители вызывают сдвиг в поверхностном натяжении, изменяют диспергируемость

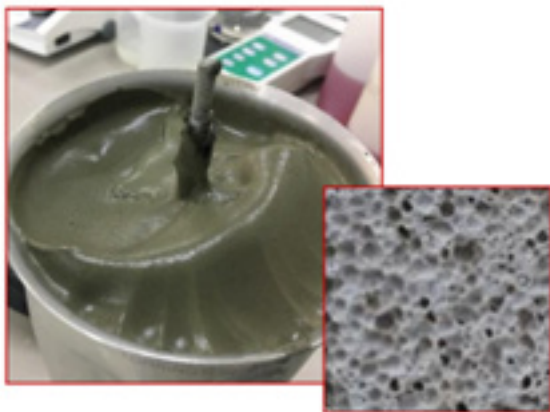


Рис.3 – Образец цементного камня без использования пеногасителей

твердых веществ или то и другое, так что условия, необходимые для получения пены, больше не присутствуют.

Дисперсанты

Цементные растворы представляют собой высококонцентрированные суспензии твердых частиц в воде.

Цементные дисперсанты, также известные в строительной промышленности как пластификаторы и суперпластификаторы, используются для получения желаемых реологических свойств.

Цементные диспергаторы снижают как предел текучести, так и пластическую вязкость. При высоких концентрациях значение текучести приближается к нулю, и цементный раствор становится практически ньютоновским. К сожалению, очень низкие значения выхода часто приводят к нестабильности суспензии, что приводит к осаждению твердых веществ или образованию свободной воды.

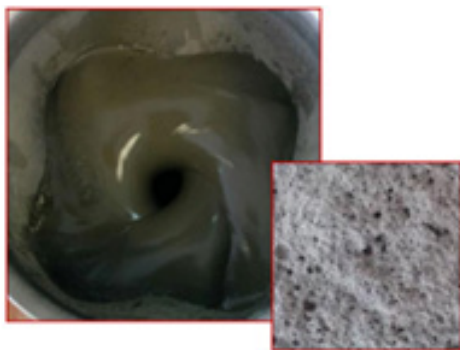


Рис.4 – Образец цементного камня без добавления дисперсантов

Утяжелители

Высокое поровое давление, нестабильные стволы скважин, а также деформируемые пласты контролируются высокими гидростатическими давлениями. В таких условиях плотность бурового раствора превышает нормы. Для поддержания контроля над такими скважинами также необходимы цементные растворы одинаковой или большей плотности. Одним из способов увеличения плотности цементного раствора является просто уменьшение количества воды в смеси. Максимальная плотность раствора, достижимая при восстановлении воды в смеси, составляет $2,16 \text{ г/см}^3$. Когда требуются более высокие плотности раствора добавляют материалы с высокой удельной массой, называемые утяжелителями.

Ускорители

В практике часто возникают случаи когда необходимо сократить время застывания цементного раствора чтобы продолжить бурение и здесь нам нужны добавки, которые сокращают время застывания цементной системы и увеличивают скорость развития прочности на сжатие. Для решения этой проблемы применяют ускорители.

Замедлители

Во время цементажа главная цель работы не поймать козла и успешно довести цементный раствор до необходимой глубины. Главным препятствием здесь может быть сгущение и непрокачиваемость раствора.

Для этого существуют химические вещества, такие как замедлители, которые задерживают время схватывания цементной системы и позволяют увеличить время прокачиваемости раствора.

Расширители

Цементные расширители обычно используются для выполнения одного или обоих из следующих действий.

- Уменьшить плотность раствора. Снижение плотности раствора снижает гидростатическое давление во время цементирования. Это помогает предотвратить вызванную потерю циркуляции из-за разрушения слабых образований.

- Увеличение выхода раствора: расширители снижают количество цемента, необходимое для производства заданного объема отвержденного продукта. Это приводит к большей экономии.

Агенты контроля потери жидкости

Когда цементные растворы закачиваются в пласт, перепад давления между цементным раствором и пластом приводит к фильтрации (рис.5). Водная фаза цементного раствора уходит в пласт, оставляя твердые частицы позади. В зависимости от относительной важности эрозионных сил во время потока жидкости и сил прилипания, вызванных фильтрацией, твердые вещества могут образовывать наружную фильтрационную корку вдоль стенки пласта или оставаться взвешенными в цементном растворе.

Если потеря жидкости не контролируется, это может привести к нескольким серьезным последствиям, которые могут привести к провалу работы. По мере уменьшения объема водной фазы, плотность суспензии увеличивается; в результате производительность цементного раствора отличается от первоначального дизайна. Для достижения снижения скорости потери жидкости в дизайн раствора включены материалы, известные как агенты контроля потери жидкости. Как только начинается потеря жидкости через пласт, фильтрационная пленка цементного раствора осаждаются на поверхности пласта, предотвращая потерю воды из раствора.

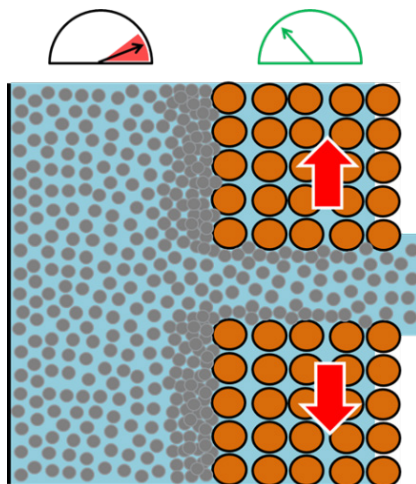


Рис.5 – Фильтрация раствора

Практическая часть

Лабораторные испытания цемента и цементирующих материалов являются неотъемлемой частью процесса цементирования. Испытания начинаются на предприятиях по производству цемента и добавок для контроля качества продукции и продолжаются на этапах проектирования раствора в лабораториях эксплуатирующей компании.

В ходе исследовательских работ мы проводили лабораторные тесты для получения оптимального рецепта цементного раствора. Ниже будет рассмотрено всё необходимое оборудование для испытаний и методика испытаний.

Для проведения серий экспериментов был выбран цементный раствор для месторождения Тенгиз в Атырауской области. Ниже представлены ряды лабораторных тестов, при помощи которых выбирается подходящий дизайн цементного раствора:

Определение реологических свойств



Рис.6 – Вискозиметр Куэтта

В лабораторных условиях цементный раствор был приготовлен из пропорции воды, цемента, сухих и жидких добавок в объемах, равных 600 мл (API (RP) 10B) .

Основной критерий для цементного раствора заключается в том, чтобы реология соответствовала удалению бурового раствора. Реология может быть увеличена за счет использования загустителей, таких как бентонит, понизителя седиментации.

Типичный ротационный вискозиметр без давления, также известный как вискозиметр Куэтта (рис.6), должен использоваться для измерения реологических свойств жидкостей, используемых при цементировании скважин.

Раствор выливают в кружку вискозиметра до линии внутри кружки. После записываются показания шкалы с различными скоростями вращения. Порядок чтения имеет решающее значение. Чтения должны быть сделаны сначала по возрастанию, а затем в порядке убывания. Реологические измерения высчитываются как среднее значение показаний возрастания и убывания.

В дополнение к расчетам вязкости и напряжению сдвига, лабораторные измерения реологических параметров могут предоставить информацию о других характеристиках раствора. Уменьшение значений сдвиговых напряжений, измеренных при снижении скорости сдвига, по сравнению с измеренными при увеличении скорости сдвига, могут указывать на то, что раствор является тиксотропным.

Определение времени сгущения



Рис.7 – Консистометр

Испытания на время сгущения предназначены для определения продолжительности времени, в течение которого цементный раствор остается в перекачиваемом жидком состоянии в условиях температуры и давления в моделируемой скважине.

Испытательный раствор оценивается в герметичном консистометре (рис.7), который измеряет консистенцию испытательного раствора, содержащуюся во вращающейся чаше, в смоделированных условиях ствола скважины. Большинство устройств способны выдерживать цементные растворы с максимальной температурой и давлением 204°C и 175 МПа.

Профили консистенции времени сгущения часто начинаются с низкой консистенцией, которые длятся несколько часов. Затем, когда раствор начинает сгущаться, консистенция увеличивается с постоянно увеличивающимся наклоном пока не будет достигнута 100 Вс.

Определение потери жидкости



Рис.9 – Оборудование по определению водоотдачи

Испытания на потерю жидкости измеряют обезвоживание раствора во время и сразу после цементной работы. После кондиционирования в смоделированных условиях в стволе скважины испытательную суспензию помещают в нагретую камеру и подвергают воздействию разности давлений 6,9 МПа. Потери фильтрата измеряют на стандартной фильтрующей среде (экран 45 мкм [325 меш], поддерживаемый на экране 250 мкм [60 меш]). Через 30 мин собранный объем фильтрата отмечают. Если весь фильтрат проходит через сито менее чем за 30 минут, для расчета потери жидкости по API используется следующее уравнение.

$$\text{Водоотдача} = 2 * V_t * (5.477 / \sqrt{t})$$

где V_t = объем фильтрата (мл), собранный в момент времени t (мин);

t – время истечения фильтрата, мин.

Испытание проводится в статической нагретой фильтрующей камере, показанной на рисунке 9.

Определение свободной жидкости

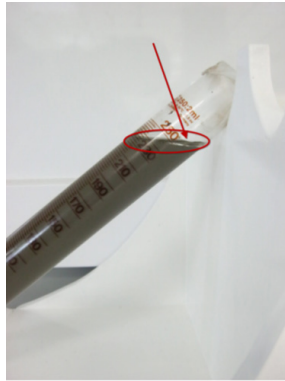


Рис.10 – Водоотстой

Когда цементному раствору дают постоять в течение некоторого времени до схватывания, вода может отделиться от раствора, мигрировать вверх и накапливаться в карманах или в верхней части колонны. Такое разделение может ухудшить зональную изоляцию, особенно в сильно отклоненном стволе скважины. Тест свободной жидкости измеряет эту тенденцию разделения в лаборатории, используя градуированный цилиндр в качестве моделируемого ствола скважины.

Процедура допускает кондиционирование суспензии при повышенных температурах и давлениях. Резерв по потере жидкости не предусмотрен. Продолжительность испытания составляет 2 часа, измеряется с момента залива суспензии в мерный цилиндр.

Определение прочности на сжатие



Рис.11 – Ультразвуковой анализатор цемента

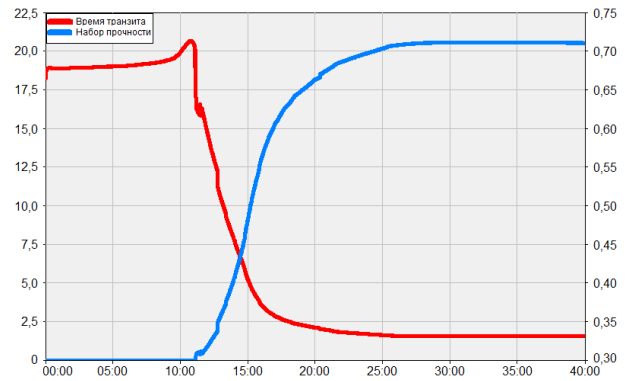


Рис.12 – График оценки прочности

Сила может быть оценена ультразвуком. Ультразвуковой анализатор цемента (рис.11) измеряет время прохождения ультразвуковой энергии через образец цемента, который затвердевает в условиях моделируемой температуры и давления. Ультразвуковое измерение является неразрушающим и может проводиться непрерывно, так как образец цемента твердеет при высоком давлении и повышенной температуре. Звуковая сила коррелируется с временем прохождения (обратной величиной скорости ультразвука) с использованием эмпирической зависимости, первоначально установленной из данных о механической прочности на сжатие и времени прохождения для различных систем. Оценка прочности наблюдается через график. Пример графика изображен на рисунке 12.

Закключение

В результате исследования разработана оптимальная рецептура цементного раствора, которая показала наилучшие результаты, включающие в себя: адекватное время застывания и прочность на сжатие, отсутствие седиментации и водоотстоя, оптимальная реология для замещения бурового раствора и приемлемая водоотдача.

При проектировании цементных растворов для глубоких, высокотемпературных скважин очень важно использовать точные статическую и циркуляционную температуру. Такие данные могут быть получены от испытаний, логов, специальной записи температуры скважинными приборами или пробы раствора при циркуляции. Компьютерные симу-

ляторы также были разработаны для лучшего прогнозирования температуры скважины. Если раствор циркулирует в скважине в течение нескольких часов до цементирования, температура в скважине может значительно снижаться. В таких случаях необходимо осторожно, чтобы не до оцнить температуру циркуляции и увеличить время застывания цементного раствора.

Почему так важно учитывать все свойства цементного раствора и для чего существуют определенные требования к дизайну? Все это происходит из-за того, что скважины с глубинами более 4,500 м, с забойной температурой выше 110°C, являются распространены во всем мире. С 1970-х годов были пробурены тысячи скважин с глубинами более 7500 м. Такие скважины представляют собой большие инвестиции времени и денег; следовательно, получение успешного завершения скважины имеет первостепенное значение.

Процедуры цементирования глубоких скважин в основном такие же, как и для более мелких скважин. Однако из-за ряда скважинных условий и более сложной архитектуры скважины обычно считаются быть кри-

тическим. На таких глубинах обычно встречаются более высокие температуры и узкие кольца затрубного пространства, зоны повышенного давления и коррозионные жидкости. Следовательно, дизайн цементной системы также может быть сложным с использованием сложного набора замедлителей, понизителей водоотдачи, пластификаторов, кремнезема. Нужно быть уверенным, что цементная система может быть надлежащим образом размещена и будет поддерживать изолирование по зонам на протяжении всего срока службы скважины. В настоящее время цементный раствор используется практически во всех глубоких нефтяных и газовых скважинах.

Полная и долговечная зональная изоляция является основной целью цементной работы. В течение срока эксплуатации добывающей нефтегазовой скважины качество цементных работ напрямую влияет на экономическую долговечность скважины. С момента первой добычи скважины до ее закрытия соответствующие методы проектирования и размещения цементного раствора будут влиять на производительность скважины как физически, так и экономически.

ЛИТЕРАТУРА

1. API RP 10B, Recommended Practice for Testing Well Cements, 22nd edition. 1997. Washington, DC: API.
2. Economides, M. (1990). Well Cementing. (E. B. Nelson, Ed.) Sugar Land, Texas: Schlumberger Educational Services.
3. Lyons, W. C. (Ed.). (1993). Handbook for Petroleum and Natural Gas Engineers (Vol. 1). Houston: Gulf Publishing Company.
4. Nelson, E. B., Baret, J. F., & Michaux, M. (1993). Additives and Mechanisms of Action. Sugar Land, Texas: Schlumberger Educational Services.
5. Nelson, E. B. (1990). Well Cementing. (E. B. Nelson, Ed.) Sugar Land Texas 77478: Schlumberger Educational Services.
6. Rae, P. (1990). Cement Job Design. Sugar Land, Texas: Schlumberger Educational Services.