

Испытания тампонажных цемента в соответствии со стандартами API/ISO: аппаратная реализация методов.

Испытания тампонажных цемента в соответствии со стандартами API/ISO: аппаратная реализация методов.

Рассмотрены основные методы испытаний тампонажных цемента в соответствии со стандартами API/ISO. Приведено оборудование, позволяющее выполнить испытания в соответствии с указанными методами.

The basic methods of testing well cements in accordance with the standards of API / ISO are considered. The equipment allowing to perform tests in accordance with the specified methods is given.

Введение.

Среди научно-технических задач, связанных со строительством скважин, задача создания качественной цементной крепи в заколонном пространстве скважины, является наиболее ответственной, так как при этом обеспечивается надежность, герметичность и экологическая безопасность подземного сооружения на протяжении всего срока службы.

В этой связи особую важность приобретают проблемы разработки новых и совершенствования существующих рецептур тампонажных растворов и цементных композиций, соответствующих конкретным горно-геологическим условиям.

Разработка, совершенствование составов и технологии получения тампонажных растворов с регулируемыми технологическими свойствами, обеспечивающих качество крепления, разобщения продуктивных горизонтов и долговечность газовых и нефтяных скважин, требуют проведения комплекса лабораторных физико-механических испытаний тампонажного раствора и цементного камня. И в этой связи, лабораторные исследования представляются важным звеном в процессе проектирования и строительства скважин.

Методы испытаний тампонажных цемента.

Общепризнанными мировыми стандартами на методы испытаний тампонажных цемента являются стандарт Американского Нефтяного Института (API)/ стандарт Международной организации по стандартизации (ISO), и в

частности их разделы:

- API Specification 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing / ISO 10426-1, Petroleum and natural gas industries—Cements and materials for well cementing—Part 1: Specification,
- API Recommended Practice 10B-2, Recommended Practice for Testing Well Cements/ ISO 10426-2, Petroleum and natural gas industries—Cements and materials for well cementing—Part 2: Testing of well cement.

Часть стандарта API Specification 10A/ ISO 10426-1 устанавливает требования и дает рекомендации по восьми классам тампонажных цементов (А, В, С, D, E, F, G и H), включая требования к химическому составу и физическим свойствам и методики физико-механических испытаний.

Часть стандарта API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 устанавливает требования и дает рекомендации по испытаниям цементных растворов и связанных с ними материалов в условиях, имитирующих условия скважины.

Помимо этого, в указанных выше стандартах приведены требования к испытательному оборудованию, даны размеры и схемы отдельных узлов для производителей.

Основные методы физико-механических испытаний тампонажных цементов и контролируемые параметры, регламентируемые указанными стандартами, включают:

- Определение плотности (удельного веса),
- Определение реологических свойств и ПСНС,
- Определение времени загустевания (консистенции),
- Определение водоотделения (несвязной воды),
- Определение фильтрационных потерь (водоотдачи),
- Определение предела прочности тампонажных цементов при сжатии,
- Неразрушающие испытания ультразвуком,
- Определение проницаемости цементного камня по газу /жидкости,

Приготовление тампонажного раствора.

Скорость сдвига и время сдвига являются важными факторами при смешивании цементных растворов, и изменение этих параметров влияет на рабочие показатели цементных растворов.

Смеситель для приготовления цементных растворов должен иметь объем 1

литр (или одна кварта), привод к донной части, и мешалку лопастного типа.

В процессе приготовления раствора скорость вращения и время перемешивания при заданной скорости должны составлять:

- 4000 об/мин \pm 200 об/мин (66,7 об/с \pm 3,3 об/с) в течение не более 15 с (добавляют цемент к требуемой массе воды затворения),
- 12000 об/мин \pm 500 об/мин (200 об/с \pm 8,3 об/с) в течение 35 с \pm 1 с (продолжают перемешивание после введения цемента в воду затворения).

В случае необходимости приготовления больших объемов цементного раствора, используется альтернативный метод приготовления, приведенный в

приложении к стандарту API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 (Приложение А). Требования к аппаратной части аналогичны требованиям, описанным выше, за исключением того, что смеситель должен иметь контейнер для смешивания вместимостью 4 – 5 л.

При этом скорость вращения и время перемешивания при заданной скорости должны составлять:

- 6000 об/мин или выше без нагрузки в течение не более 15 с,
- 14000 об/мин или выше без нагрузки в течение времени, указанного в таблице Приложения А (в зависимости от объема цементного раствора 2000, 3000, 4000 мл время перемешивания составляет 30, 45, 55 с, соответственно).

Лабораторные смесители для приготовления тампонажных цементных растворов Модель 20 (производства компании OFI Testing Equipment, Inc.- OFITE, США) сконструированы и позволяют готовить цементный раствор в полном соответствии с требованиями указанных стандартов API/ISO. Смесители выпускаются с контейнерами для смешивания вместимостью 1 л и 4 л и лопастями мешалки выполненными из нерж. стали. Имеют три режима работы: выбор произвольной скорости, ручной режим переключения скоростей, автоматический режим переключения скоростей по программе. Заданная скорость вращения поддерживается микропроцессором, реле времени автоматически контролируют длительность перемешивания при заданной скорости. Применение соответствующего

адаптера позволяет смесителю с контейнером на 4 л работать также с контейнером объемом 1 л.

Определение плотности (удельного веса) цементного раствора.

В соответствии рекомендациями стандартов API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 предпочтительным методом измерения плотности цементного раствора является применение весов для определения плотности жидкости под давлением. Такие весы по принципу действия подобны рычажным весам для измерения плотности бурового раствора, с той разницей, что цементный раствор можно подавать в чашу для пробы фиксированного объема под давлением.

При создании давления в чашке для образца захваченные воздух или газ уменьшают свой объем до пренебрежимо малой величины, позволяя выполнить измерения плотности в условиях, наиболее приближенных к существующим в скважине.

Рычажные весы "Halliburton Tru - Wate" для определения плотности под давлением, производства OFITE, сконструированы и позволяют проводить измерения плотности в полном соответствии с требованиями указанных стандартов API/ISO. Коромысло устройства отградуировано, имеет 4 шкалы и обеспечивает требуемую стандартами точность взвешивания (до $\pm 0,1$ фунт/галлон, $\pm 0,01$ г/см³ или ± 10 кг/м³). Весы выпускаются в двух вариантах: со стандартной и метрической шкалой. Весы укомплектованы нагнетающим насосом для создания избыточного давления, принцип работы которого подобен шприцу. Крышка чаши для пробы оборудована запорным клапаном. Калибровка весов осуществляется с использованием пресной воды или жидкостей известной плотности.

Определение реологических свойств и ПСНС.

В соответствии рекомендациями стандартов API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 определение реологических свойств и предельного статического напряжения сдвига (ПСНС) цементного раствора должно выполняться с применением ротационных вискозиметров работающих под давлением (для измерений при температурах выше 88°C (190°F)), или ротационных вискозиметров, работающих при атмосферном давлении (для измерений при температурах до 88°C (190°F)). Кроме того, стандарты предполагают необходимость выбора соответствующей реологической модели (Модель бингамовской вязкопластической жидкости, либо Модель, подчиняющаяся степенному закону) для описания реологических свойств цементных растворов, которая наилучшим образом соответствует полученным данным. Выбор модели и расчет реологических параметров модели должны осуществляться с помощью регрессионного анализа, допускается также использовать менее точный «двухточечный» метод для расчета параметров моделей.

В основу работы всех ротационных вискозиметров производимых компанией OFITE положен принцип Куэтта с использованием конфигурации измерительной системы типа коаксиальные цилиндры.

Для тестирования тампонажных растворов при атмосферном давлении и температуре до 88°C, в соответствии со стандартами API/ISO, применяются:

- 8-и скоростной вискозиметр Модель 800 непосредственной индикации;

- Цифровой вискозиметр Модель 900 с возможностью подключения к ПК для сбора данных и управления при помощи специализированного ПО «ORCADА»;

Для выполнения испытаний в условиях высоких температур и давлений, в соответствии со стандартами API/ISO, используется:

- Вискозиметр высокого давления Модель 1100 (Макс. давление: 17,2 МПа, Макс. температура: 260 °С). Полностью автоматизированный прибор, оборудованный Системой Сбора Данных и Управления при помощи ПК с установленным специализированным ПО «ORCADА». В системе нагрева «SAFEHEAT» не используется теплоноситель; Смачиваемые части прибора изготовлены из сплава HASTELLOY;

Магнитная конструкция системы установки/снятия внутреннего цилиндра (боба) «KlikLock» на вискозиметрах Модель 900 и 1100 адаптирована для работы с высоковязкими и твердеющими растворами.

Специализированное ПО «ORCADА» позволяет в автоматическом режиме проводить испытания цементных растворов, выполнять регрессионный анализ, рассчитывать коэффициент корреляции и реологические параметры модели.

Определение времени загустевания (консистенции).

Определение времени загустевания в соответствии с требованиями стандартов API/ISO предполагает использование консистометра, работающего под давлением.

Установка включает вращающийся цилиндрический контейнер для цементного раствора, оснащенный стационарной лопастной мешалкой в сборе и помещенный вместе с ней в сосуд для работы под давлением, обеспечивающий возможность выдерживать давления и температуры, имитирующие условия в скважине. Контейнер для цементного раствора вращается со скоростью 150 об/мин ± 15 об/мин. Лопасть мешалки и все детали контейнера, контактирующие с цементным раствором, должны быть сконструированы из коррозионно-стойких материалов. Пространство между стенками контейнера для цементного раствора и стенками сосуда для работы под давлением должно быть полностью заполнено маслом на углеводородной основе. Консистенцию цементного раствора выражают в единицах Бердена (Bc) и определяют с помощью потенциометрического механизма и цепи измерения напряжения. Калибровка механизма потенциометра осуществляется при помощи грузов и служит для воспроизведения серии значений крутящих моментов, соответствующих определенным значениям консистенции.

Модели консистометров производства OFITE, позволяющие проводить измерения при высоких давлениях и температурах:

- Модель 100: одно/двух камерный (макс. температура: 204 °С, макс. давление: 172,4 МПа);
- Модель 120: одно/двух камерный (макс. температура: 316°С, макс. давление: 275,8 МПа);

- Модель 130: с одной камерой (макс. температура: 204°C, макс. давление: 110,4 МПа).

Все модели оснащены электронным графопостроителем с цветным сенсорным дисплеем для регистрации данных по консистенции, давлению и температуре в реальном времени с возможностью переноса данных на ПК.

Все консистометры могут оснащаться Цифровой Системой Сбора Данных (DAS) и управления при помощи ПК и специализированного программного обеспечения.

Определение водоотделения (несвязной воды).

В соответствии с требованиями стандартов API Specification 10A/ ISO 10426-1 для определения процента несвязной воды необходимо использовать коническую колбу вместимостью 500 мл (ASTM E 1404, Тип I, класс 2 или DIN 12385). Перед заполнением конической колбы приготовленный цементный раствор перемешивают в консистометре в течение 20 мин \pm 30 с, при этом поддерживают температуру ванны на уровне 27°C \pm 1,7°C (80°F \pm 3°F) в течение всего периода перемешивания.

Консистометр, работающий при атмосферном давлении, также применяется для перемешивания и предварительного кондиционирования цементного раствора в других типах испытаний (определение реологических свойств, водоотдачи). Консистометр атмосферного давления состоит из вращающегося со скоростью 150 об/мин \pm 15 об/мин (2,5 об/с \pm 0,25 об/с) контейнера с цементным раствором, оснащенного стационарным лопастным устройством и механизмом потенциометра, жидкостной ванны с контролируемой температурой. Лопасты и все части контейнера, контактирующего с цементным раствором, должны быть изготовлены из коррозионно-стойкого материала.

Компания OFITE производит две модели консистометров атмосферного давления:

- Модель 60: механический потенциометр, показания считываются по нанесенной на крышку потенциометра шкале;
- Модель 80: электромеханический потенциометр, оснащен электронным графопостроителем (регистрация температуры и консистенции во времени), встроенная сигнализация оповещения об окончании испытания.

Обе Модели имеют конструкцию с двумя контейнерами, максимальная рабочая температура 93°C, микропроцессорный температурный ПИД-контроллер.

Определение фильтрационных потерь (водоотдачи).

В соответствии рекомендациями стандартов API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 определение фильтрационных потерь производится в статических условиях с применением статической ячейки для определения фильтрационных потерь, либо с использованием ячейки для определения фильтрационных потерь оснащенной мешалкой. В случае применения статической ячейки без встроенной мешалки фильтрационные потери определяются после предварительного кондиционирования цементного раствора в консистометре, работающем при атмосферном и/или при повышенном давлении (в зависимости от требуемых условий испытаний). В случае использования ячейки для определения фильтрационных потерь оснащенной мешалкой, предварительное кондиционирование цементного раствора осуществляется непосредственно внутри самой ячейки.

Ячейка для определения фильтрационных потерь, работающая при высоких температурах и давлениях (с мешалкой или без нее), оснащается двойным ситом с размером 45 мкм (325 меш)/ 250-мкм (60-меш) и имеет площадь фильтрации

22,6 см² (3,5 кв.дюйма). Водоотдача определяется при приложенном к ячейке дифференциальном давлении равном 7000 кПа ± 300 кПа (1000 ± 50 фунтов на кв.дюйм). Для проведения испытаний при температуре выше 88°C (190°F) используется приемник с функцией создания противодействия, чтобы предотвратить закипание фильтрата при температуре испытания.

Анализатор водоотдачи цемента с перемешиванием Модель 40, производства OFITE, имеет специальную конструкцию испытательной ячейки со встроенным узлом лопатки для предварительного кондиционирования цемента непосредственно внутри ячейки. Нагревательная печь с установленной в нее испытательной ячейкой способна вращаться не менее чем на 180⁰ вокруг своей оси.

Максимальное давление: 13,8 МПа.

Максимальная температура: 204,4 °C. Температура задается и поддерживается с помощью цифрового температурного программируемого ПИД-контроллера.

Диапазон скорости вращения лопатки при кондиционировании: 5 - 200 об/мин.

Компания OFITE производит также фильтр-прессы высокого давления и температуры со статической испытательной ячейкой для тестирования цементных растворов объемом 500 и 175 мл (давление до 13,8 МПа).

Определение предела прочности тампонажных цементов при сжатии.

Определение прочности при сжатии в соответствии с требованиями стандартов API/ISO предполагает испытание образцов цемента кубической формы (размером 2"х2"х2"), выдержанных в воде в заданных условия (температура и давление) в течение определенного периода времени.

Стандарты регламентируют применение двух типов ванн или резервуаров для обработки образцов цемента, помещенных в специальные формы, в воде:

- Ванна (термостат) для обработки при атмосферном давлении (без приложения давления) и температурах до 66°C (150°F), оснащенная мешалкой или системой циркуляции;
- Ванна (автоклав) для обработки под давлением, способная поддерживать давление 20,7 МПа ± 0,345 МПа (3000 ± 50фунт на кв.дюйм) при соответствующей конечной температуре испытания.

После извлечения из охлаждающей ванны с водой (при температуре 27°C ± 3°C (80°F ± 5°F)) образцы цементного камня сразу же помещают в испытательную машину для определения прочности при сжатии.

Скорость нагружения образцов прочностью выше 3,5 МПа (500 фунтов на кв.дюйм) должна быть $71,7 \text{ кН} \pm 7,2 \text{ кН}$ в минуту. Для образцов прочностью 3,5 МПа (500 фунт на кв.дюйм) и ниже скорость нагружения должна быть $17,9 \text{ кН} \pm 1,8 \text{ кН}$ в минуту.

Компания OFITE производит следующие модели камер высокого давления и температуры для обработки цементных образцов (автоклавы):

- Модель 200: одно/двух камерный (Макс. температура: 315,6 °С, Макс. давление: 5000 PSI (34,5 МПа), Кол-во обрабатываемых образцов: 8-16);
- Портативная настольная камера набора прочности: одна камера (Макс. температура: 260 °С, Макс. давление: 5000 PSI (34,5 МПа), Кол-во обрабатываемых образцов: 4).

Давление в камерах всех моделей создается водой при помощи насоса высокого давления с пневматическим приводом.

Универсальная испытательная машина для определения предела прочности материалов при сжатии/изгибе Модель E160N, производства компании MATEST (Италия), позволяет проводить испытания цементных образцов в полном соответствии с требованиями указанных стандартов API/ISO. Машина имеет два диапазона измерения: 15кН - испытания на изгиб, 500кН - испытание на сжатие. Цифровая измерительная система «CYBER-PLUS» автоматически определяет момент разрушения и нагрузку, при которой произошло разрушение образца, рассчитывает значение предела прочности и выводит данные на цветной сенсорный дисплей. Установка произвольной скорости нарастания испытательной нагрузки на образец и регулирование точности поддержания скорости нарастания нагрузки.

Возможность подключения прибора к компьютеру для сбора и обработки данных посредством специализированного ПО «UTM2».

Неразрушающие испытания ультразвуком.

Рекомендации по применению неразрушающего звукового метода определения прочности при сжатии тампонажных цементов даются в API Recommended Practice 10B-2 / ISO 10426-2, где приведены общие требования к аппаратному оформлению подобного прибора и проведению на нем эксперимента.

Определение прочности Ультразвуковым анализатором основано на корреляциях между временем прохождения ультразвукового сигнала через образец цемента и прочностью на сжатие, измеренной разрушением состаренных в аналогичных условиях образцов, под воздействием механической нагрузки. При этом, в документации API четко различаются понятия «Звуковой прочности», определяемой, как степень развития прочности цементного образца и рассчитываемой посредством измерения скорости прохождения звука через образец на основе специальных математических корреляций, и «Прочности при сжатии», измеряемой непосредственно и определяемой силой, необходимой для разрушения образца цементного камня.

Компания OFITE производит следующие модели Ультразвуковых анализаторов:

- Ультразвуковой анализатор цемента с одной ячейкой (максимальное давление: 110,3 МПа, максимальная рабочая

температура: 204,4 °C);

- Ультразвуковой анализатор цемента с двумя ячейками: два одноячеечных прибора, совмещенных в одном корпусе (максимальное давление: 110,3 МПа, максимальная рабочая температура: 204,4 °C);
- Сдвоенный ультразвуковой анализатор цемента: две ячейки, компактный дизайн (максимальное давление: 34,5 МПа, максимальная температура: 204,4°C)

Приборы оборудованы Системой Сбора Данных и подключаются к персональному компьютеру. Компьютер с установленным специализированным программным обеспечением осуществляет непрерывный сбор и обработку данных, измеряет времена прохождения сигнала во времени и интерполирует значения прочности при сжатии для каждой испытательной ячейки.

Давление в ячейках всех моделей создается водой при помощи насоса высокого давления с пневматическим приводом. Работой нагревательного элемента управляет программируемый температурный ПИД-контроллер.

Возможность непосредственного подключения к штатным испытательным ячейкам Ультразвуковых Анализаторов Цемента дополнительной Системы Измерения Объемного Расширения Цемента (VCED) OFITE и Системы Измерения СНС (SGSM) OFITE для определения, помимо значения прочности при сжатии, расширения/усадки и развития СНС на том же образце тампонажного цемента в условиях высоких температур и давлений.

Определение проницаемости цементного камня по газу/жидкости.

В соответствии с рекомендациями стандартов API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2 измерение проницаемости по жидкости или газу должно выполняться на формованных образцах цементного камня, обработанных в определенных условиях, либо на цилиндрических образцах (диаметр 1", длина 1"), полученных путем отбора керна из обработанных образцов цементного камня кубической формы (размером 2"x2"x2").

Перед испытанием на проницаемость по жидкости, образцы насыщают водой. Выдерживают образец погруженным в воду до начала испытания.

Перед испытанием на проницаемость по газу образцы сушат до постоянной массы в сушильном шкафу или эксикаторе.

Определение проницаемости цементного образца выполняют только в стационарном режиме. Проницаемость образцов цементного камня по жидкости и по газу рассчитывают по закону Дарси.

Тестер проницаемости цементного камня по газу (азоту) Модель 90, производства компании OFITE, предназначен для измерения газопроницаемости образцов цементного камня (керна) 1" диаметр x 1" длиной. Образец цементного камня (керна) помещается в манжету, которая вводится в «модифицированную» испытательную ячейку «Hassler» (материал – нерж. сталь 316). Расход измеряется 2 калиброванными расходомерами – на высокий и низкий расход.

Давление газа на входе в образец регистрируется по стрелочному манометру (диапазон измерения: от 0 до 200 PSI (13,6 атм), цена деления 0,5 PSI, точность 0,25% ВПИ). Давление на выходе – атмосферное. Прибор может быть оснащен цифровой Системой Сбора Данных, электронным массовый расходомером и датчиком давления.

Компания OFITE производит также цементные пермеаметры для определения проницаемости по жидкости (и газу), а также пермеаметры для определения проницаемости цементного камня по жидкости и газу в условиях высоких давлений и температур.

Заключение.

Правильность выбора методов лабораторных исследований тампонажных цементов, а также их соответствующая аппаратная реализация, в конечном итоге, могут оказаться решающими и повлиять на качество цементирования скважины в целом.

Специалист по оборудованию OFITE

К.Х.Н.

Чжу Денис Петрович

Источник: <https://ofite.ru/node/258>