

МНОГОЧАСТОТНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД И ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦЕМЕНТАЦИИ СКВАЖИН С ОДНОСТОРОННИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ПРИЕМОМ УПРУГИХ ВОЛН С ОГОЛОВКА СКВАЖИНЫ

А.С. МАЛАЦИОН, Н.К. АНДРЕЕВ

Казанский государственный энергетический университет

Предлагается акустический метод для мониторинга состояния заколонного цементного кольца скважины.

Представлены краткий обзор метода и описание прибора для контроля цементации скважин. Приведена математическая модель распространения упругих волн в системе обсадная колонна скважины – цементное кольцо с дефектными и бездефектными участками. Проанализированы влияние отражения волн от границ двух сред и зависимость коэффициента затухания упругих волн от частоты и местоположения дефектных участков вдоль тела скважины. Метод является оперативным, не требует опускания аппаратуры в тело скважины и поэтому является менее затратным. Метод предлагается использовать в комбинации с другими геофизическими методами каротажа скважин.

Ключевые слова: контроль цементации скважин, распространение, затухание, отражение, упругие волны.

Добыча нефти и газа с одновременным сокращением затрат и вредного воздействия на экологию является одной из главных задач топливно-энергетического комплекса. В настоящее время на участках нефтедобычи уделяется большое внимание контролю технического состояния скважин, особенно целостности цементного кольца обсадной колонны (согласно ГОСТ Р 53709-2009 «Геофизические исследования и работы в скважинах») [1].

Задачей настоящей работы является представление нового многочастотного акустического метода и прибора для контроля цементации скважин с односторонним возбуждением и приемом упругих волн с оголовка скважины.

Методика исследований

Контроль и аттестация технического состояния скважин проводится различными методами [2]. Существующие методы контроля цементации скважин (акустический каротаж, термометрия, гамма-гамма каротаж и ряд других) недостаточно оперативны и требуют остановки технологического процесса добычи для опускания датчиков внутрь скважины. В то же время известен прибор и метод «виброакустической цементометрии», который относится к эхоимпульсным методам [3, 4]. Этот метод применяется в комбинации с другими каротажными методами и отличается от них более высокой оперативностью, не требует погружения датчиков в скважину и является менее затратным. Несмотря на ряд достоинств, метод требует модификации для повышения достоверности контроля, поскольку опирается на зондирование и обработку результатов измерений только на двух частотах и не использует в полной мере характеристики сигнала. Предлагаемый метод является дальнейшим развитием метода виброакустической цементометрии.

В используемом методе [6–11] излучающая поверхность пьезоэлектрических преобразователей ориентирована нормалью вдоль тела колонны, так что в стальной трубе, покрытой цементом, распространяются продольные упругие волны. Здесь и

далее цифрой 1 обозначен участок обсадной колонны с нормальным качеством цементации и состояния стальной трубы, а участок колонны с дефектами – цифрой 2. Двигаясь по обсадной колонне с дефектами цементации и дефектами стальной трубы, упругие волны частично отражаются от дефектов и частично проходят дальше. Поэтому в теле колонны распространяются волны вида

$$u_1 = A_1 \exp[i(\omega t - K_1 x)] \exp(-\delta_1 x) + B_1 \exp[i(\omega t + K_1 x)] \exp(\delta_1 x). \quad (1)$$

Здесь A_1 и B_1 – амплитуда волны; K_1 – волновое число; ω – круговая частота; t – время; x – ось, вдоль которой распространяется волна; δ_1 – коэффициент затухания звука в среде 1, которая считается бездефектной. Аналогичное выражение может быть написано для среды 2 с дефектом. Первое слагаемое соответствует волне, движущейся слева направо, а второе – волне, движущейся справа налево. Аналогичное выражение может быть написано для среды 2 с дефектом.

Коэффициенты отражения R и пропускания по амплитуде W для акустической волны, согласно работе [5], равны, соответственно:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 S_2 - \rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2 + \rho_1 c_1 S_1}, \quad W = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_2 c_2 S_2}{\rho_2 c_2 S_2 + \rho_1 c_1 S_1}, \quad (2)$$

где ρ_i – плотности сред, $i = 1, 2$; c_i – скорости распространения волны; S_i – площади поперечного сечения первой и второй сред, на границе которых происходит отражение и прохождение волн; Z_1 и Z_2 – механические импедансы соответствующих сред.

Согласно выражениям (1) и (2) волна распространяется с затуханием. При наличии дефектов волна после отражений от границ дефектов и при прохождении через эти границы, а также после отражений от концов трубы, соединительных муфт, соединений с изменением площади поперечного сечения, поступает в приемник многократно ослабленной. Тем не менее, в отраженной волне содержится полезная информация, извлечение которой и является целью предложенного метода.

Таким образом, метод основан на использовании комплекса данных, полученных путем: а) одностороннего возбуждения и регистрации эхо-сигналов, отраженных от дефектов, концов и элементов конструкции скважины; б) вычисления зависимости коэффициента затухания сигнала от частоты зондирования $\delta(\omega_n)$ в звуковом диапазоне 1–20 кГц; в) определения координат дефектов и элементов конструкции скважины $x_i = c_k t_i$ по времени регистрации эхо-сигналов t_i и скорости распространения упругих волн на различных участках в теле скважины c_k ; г) оценки изменений состояния скважины сопоставлением результатов измерений, разделенных достаточно большими периодами регламентного контроля T_c . При сопоставлении обязательно учитываются данные других физических методов, что повышает достоверность данного метода.

Основные результаты

Для реализации метода создана экспериментальная установка, включающая прибор для контроля цементации скважин и исследовательский стенд [6, 8, 9]. Прибор состоит из возбуждителя (передатчика) акустических (упругих) волн, приемника, системы управления и источников питания. Прибор работает в диапазоне частот 1–20 кГц. Возбуждение и прием осуществляются пьезоэлектрическими преобразователями. Предусмотрена возможность многоканального возбуждения и приема сигналов наборами датчиков разных частот. Для повышения надежности в приборе заведены контрольные точки. Управление производится от персонального компьютера в среде графического программирования.

Исследовательский стенд имеет в составе модель цементированной обсадной колонны с изменяемыми характеристиками дефектных и бездефектных участков. Он предназначен для отработки методик измерений и испытания метода и прибора. В составе стенда имеются трубопровод, состоящий из 15 отрезков стальной трубы диаметром $\frac{3}{4}$ дюйма, длиной 2 м каждый. Из них два отрезка покрыты слоем цемента так, что внешний размер цементной оболочки равен 100x100 мм. В одном из них имеется участок длиной 1 м с отслоением цемента. Различная степень сцепления цемента со стальной колонной моделируется путем использования деревянного каркаса с внешними размерами 180x80 мм, внутрь которого укладывается трубопровод. Каркас, разделенный вдоль длины на две половинки, стягивается болтами, так что степень сцепления его с трубопроводом может регулироваться.

Создано алгоритмическое и программно-техническое обеспечение для автоматизированного управления процессами измерений, контроля и тестирования узлов прибора, обеспечивающее более надежное функционирование прибора, обработку информативных сигналов и представление результатов в реальном масштабе времени с выявлением вероятных дефектных участков скважины [10, 11].

Метод проверен экспериментально на исследовательском стенде и реальных скважинах. Ниже излагаются результаты испытаний метода и прибора на исследовательском стенде. Результаты испытаний на исследовательской скважине Казанского федерального университета будут опубликованы в другой статье.

Эксперименты проведены в 4 этапа при следующих конфигурациях установки:

- 1) трубопровод длиной 30 метров без каркаса;
- 2) вместо секций, расположенных на 24–28 метрах, установлены упомянутые выше две секции с цементом;
- 3) местоположение секций с цементом смещается в середину трубопровода и находится в промежутке 14–18 метров;
- 4) в дополнение к конфигурации 3 трубопровод нагружается каркасом на протяжении 18–28 метров.

Получены зависимости затухания звука δ при конфигурациях стенда (1–4) на частотах зондирования $f_0 = 3 \div 20$ кГц с шагом 1 кГц (рис. 1).

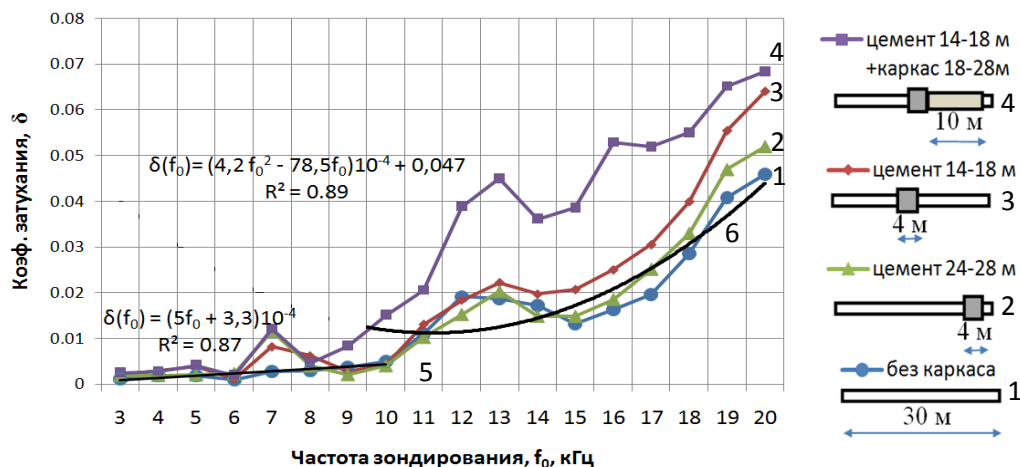


Рис. 1. Зависимость затухания звука $\delta(f_0)$ на частотах зондирования $f_0 = 3 \div 20$ кГц при изменении

местоположения нагружающих оболочек для трубопровода длиной 30 метров: 1 – без каркаса;

2 – цемент на 14–18 м; 3 – цемент на 24–28 м; 4 – цемент на 14–18 м и каркас на 18–28 м;

5 – аппроксимация кривой 1 для диапазона 3–10 кГц; 6 – аппроксимация кривой 1 для диапазона 10–20 кГц

При отсутствии каркаса (конфигурация 1) коэффициент затухания δ растет с увеличением частоты зондирования f_0 . Нагрузка конца трубопровода цементированными секциями (конфигурация 2) приводит к увеличению затухания в $\approx 1,15$ раза. Смещение цементированных секций в середину (конфигурация 3) увеличивает затухание в среднем в $\approx 1,3$ раза. Максимальное увеличение затухания происходит при установке каркаса (конфигурация 4): в среднем $\approx 1,8$ раза.

Неожиданным результатом является наличие на графиках 1, 2, 3, 4 двух участков с приблизительно линейной зависимостью от частоты в диапазоне 3–10 кГц и с приблизительно квадратичной зависимостью от частоты в диапазоне 12–20 кГц. Такое явление наблюдалось в диапазоне 2–20 МГц при исследовании затухания ультразвука как функции частоты для различных размеров зерен в чугунах [12]. По аналогии можно предположить, что обнаружена квадратичная зависимость, только в звуковом частотном диапазоне, частоты которого на три порядка ниже. В цитируемой работе явление квадратичной зависимости от частоты зондирования объясняется вкладом в затухание ультразвука от рассеяния волн в анизотропной среде, состоящей из матрицы зерен и частиц графита в чугунах. Если средний размер зерна $D_{\text{ср}}$ в 20 раз меньше длины волны λ , коэффициент затухания представляет собой функцию частоты f^2 . Для постоянных значений δ/f и при условии, что длина волны ультразвука $\lambda \leq 20 D_{\text{ср}}$, затухание можно описать формулой

$$\delta = \delta_1 f + \delta_2 f^2, \quad (3)$$

где δ_1 и δ_2 – соответствуют потерям вследствие поглощения и рассеяния в среде. В нашем случае подразумевается затухание продольной волны.

Рассмотрим более подробно результаты эксперимента по определению координат цементированного дефектного и бездефектного участков трубопровода (рис. 2). При 85% и более процентах отсутствия цемента (каркаса) на трубопроводе (конфигурация 1, 2, 3) достаточно сложно интерпретировать местоположение цементных секций из-за наложения собственных колебаний трубопровода. Однако при конфигурации 4 (см. выше) наблюдается спад амплитуды сигнала в области расположения каркаса и цементных участков.

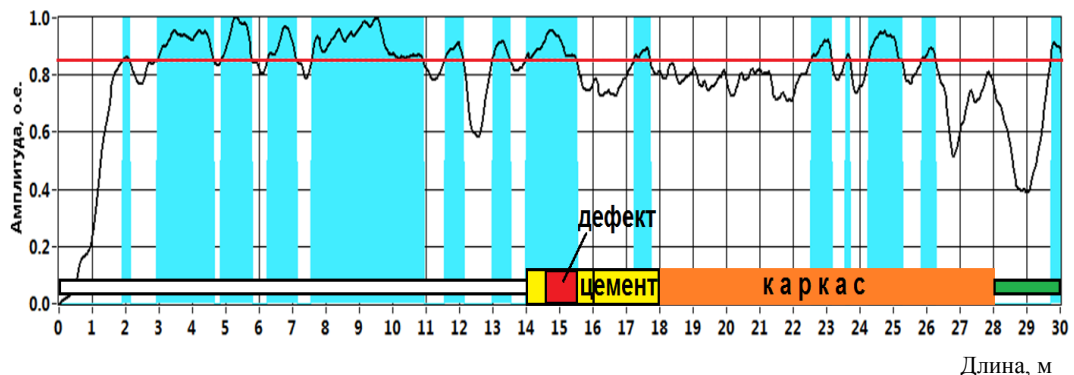


Рис. 2. Определение зоны отсутствия каркаса: каркас находится в зоне от 20 до 30 метров трубопровода; частота зондирования 16 кГц, пороговый уровень сигнала $S_L = 0,85$

Секции с цементом расположены таким образом, что первая секция (14–16 м) – дефектная (с отслоением цемента), вторая (16–18 м) – без дефектов. Видно, что в районе первой секции (14–15,5 м) идет рост амплитуды сигнала. Также наблюдается рост амплитуды сигнала в районе последней секции (30 м) – отражение от конца трубопровода.

Пороговый уровень $S_L=0,85$ был установлен по эхо-сигналу от цементной оболочки в координате 14 м. Расчётное значение коэффициента дефектности составило $R_{\text{деф}} = 0,39$ при «эталонном» значении $R_{\text{деф } \varepsilon} = 0,5$.

Дополнительно получены следующие коэффициенты затухания звука для различных вариантов местоположения каркаса при частоте зондирования 10 кГц (примечание: координата 0 метров – место установки приемника и излучателя):

- 1) $\delta=0,0226\pm 4\cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ ненагруженный трубопровод;
- 2) $\delta=0,0782\pm 4\cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ нагруженный трубопровод в районе 0–10 метров;
- 3) $\delta=0,0519\pm 4\cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ нагруженный трубопровод в районе 10–20 метров;
- 4) $\delta=0,0322\pm 4\cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ нагруженный трубопровод в районе 20–30 метров.

По коэффициенту затухания δ для различных конфигураций стенда можно сделать вывод, что сигнал затухает сильнее при нагружении каркасом ближней зоны трубопровода (0–10 метров). На практике это может означать, что в случае хорошей цементации направления обсадной колонны и малой амплитуды зондирования можно потерять информацию о дальней зоне скважины. Эти выводы согласуются с результатами численного моделирования, проведенного нами в разделе 2.3.

По результатам наших исследований установлено: затухание растет с повышением доли покрытия трубопровода оболочкой и зависит от материала оболочки. Необходимо ещё раз подчеркнуть, что квадратичный участок зависимости затухания от частоты появляется, начиная с некоторой частоты $f_{\text{нач}}$, которая в нашем случае каким-то образом связана с неоднородностями структуры трубопровода и, возможно, размерами этих неоднородностей. Связь между рассмотренными параметрами может быть установлена путем дальнейших, более подробных, исследований.

Выводы

На основе результатов экспериментальных испытаний на исследовательском стенде и на реальных объектах выявлена связь амплитуды и степени затухания акустических эхо-сигналов с физическими характеристиками дефектных и бездефектных участков скважины. Выявлена возможность контроля динамики развития дефектов во время эксплуатации скважины по изменению степени и характера затухания сигнала в колонне в звуковом диапазоне частот по результатам периодического контроля и аттестации.

Практическая и теоретическая значимость

Теоретическая значимость заключается в разработанном методе оценки целостности цементного кольца скважины по комплексу информативных характеристик откликов на импульсное зондирование, произведенное с оголовка скважины в звуковом диапазоне частот.

Прибор для акустического контроля цементации скважин может быть применен для периодического мониторинга состояния цементного кольца нефтегазовых и артезианских скважин в процессе строительства и эксплуатации без их длительного останова. Реализованный в аппаратуре многочастотный акустический метод является экспрессным и малозатратным, по сравнению с каротажными методами, и применяется совместно с ними. Анализ результатов измерений с помощью разработанной программы позволяет оперативно в полевых условиях по затуханию звукового сигнала в колонне и количеству дефектов цементации оценивать возможность дальнейшей эксплуатации скважины.

Summary

A brief overview of the method and the description of the device to control the cementation of well casing based on one-sided excitation and reception of elastic waves

from the top of the well is given. The mathematical model of propagation of elastic waves in the system of a well casing and its cement ring containing defective and defect-free areas is considered. The influence of the reflection waves from the boundaries of the two solid mediums, and the frequency dependence of the attenuation coefficient of elastic waves and location of defective areas along the pipeline of a well are taken into account. The method is sufficiently rapid, does not require the lowering of the measurement instrument into the well body and is therefore less costly in comparison with other methods. A method is proposed to use in combination with other geophysical methods of well logging.

Keywords: *control of the cementation of wells, casing, propagation, attenuation, reflection, electromagnetic wave.*

Литература

1. ГОСТ Р 53709-2009 «Геофизические исследования и работы в скважинах. Скважины нефтяные и газовые. Общие требования». М.: Изд-во Стандартиформ, 2010. 39с.
2. Геофизические методы исследования скважин: Справочник геофизика / под ред. В.М. Запорожца. М.: Недра, 1983 С. 224-230.
3. Козлов А.В. Разработка экспресс-технологии внескважинной цементометрии кондукторов. Автореф. дис. ... канд. минералогических наук. Казань, 1999.
4. Пат. 2055176 Российская Федерация, МПК⁶ Е 21 В 47/00, Е 21 В 49/00. Акустический способ диагностики качества цементного кольца за кондуктором скважины / Близеев А.Б., Каримов Г.С., Козлов А.В. и др. 1996.
5. Paton B.E., Troitskii V.A., Bondarenko A.I. A method of low-frequency ultrasonic testing of extended objects by guided waves. / techn. diagnostika I nerazrushajushchii control. 2008. №2. pp. 20-30.
6. Андреев Н.К., Малацион А.С. Неразрушающий акустический контроль и диагностика технического состояния водных и нефтяных скважин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №1-2. С.107-115.
7. Андреев Н.К., Малацион А.С. Программно-технический комплекс неразрушающего акустического контроля и диагностики технического состояния водных и нефтяных скважин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №7-8. С.111-122.
8. Пат.133193 Российская Федерация, МПК Е 21 В 47/00. Прибор для акустического контроля качества цементирования скважины / Андреев Н.К., Садыков М.Ф., Малацион А.С., Чернышова М.Г. – № 2013121202; заявл. 07.05.13; опубл. 10.10.13. Бюл. № 28.
9. Пат.135155 Российская Федерация, МПК G 01 V 1/00. Прибор для акустического контроля качества цементирования скважины / Андреев Н.К., Садыков М.Ф., Малацион А.С., Чернышова М.Г. – № 2013135057; заявл. 25.07.13; опубл. 27.11.13. Бюл. № 33.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613168 РФ. Well logging control / Малацион А.С., Андреев Н.К., Садыков М.Ф. – № 2013661587; заявл. 12.12. 13; рег. 19.03.14; опубл. 20.04.14. Бюл. № 4.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611721 РФ. Well logging data processing / Малацион А.С., Андреев Н.К. – № 2013661584; заявл. 12.12.13; рег. 07.02.14; опубл. 20.03.14. Бюл. № 3.
12. Радж Балдеев, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 578 с.

Поступила в редакцию

29 июня 2016 г.

Андреев Николай Кузьмич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (ПАЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-43-18. E-mail: ngeikandreev@gmail.com.

Малацион Алексей Сергеевич – аспирант, магистр техники и технологии, ассистент кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (ПАЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8-950-3189277. E-mail: sky_captain89@mail.ru.