DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-4-9-18

УДК 550.8.05, 53.05

А.Р. Яруллин, Р.К. Яруллин, Р.А. Валиуллин (Башкирский государственный университет, г. Уфа, Российская Федерация), **Д.Н. Михайлов, В.В. Шако** (Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», г. Москва, Российская Федерация)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ИСКАЖЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ НА МАКЕТЕ СКВАЖИНЫ СО СТАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ

Airat R. Yarullin, Rashid K. Yarullin, Rim A. Valiullin (Bashkir State University, Ufa, Russian Federation), **Dmitriy N. Mikhailov, Valeriy V. Shako** (Schlumberger Moscow Research Center, Moscow, Russian Federation)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE NATURE OF ACOUSTIC NOISE SPECTRAL CHARACTERISTICS DISTURBANCE AT A LAB WELLBORE MOCKUP WITH STEEL CASING

Введение

Рассмотрена возможность использования пассивной акустической шумометрии при исследовании действующих скважин. В настоящее время на рынке геофизических услуг присутствуют несколько компаний, предлагающих к внедрению метод широкополосной скважинной шумометрии для решения практических задач в скважинах различных категорий.

Цели и задачи

Экспериментальные исследования природы искажения спектральных характеристик акустических шумов, наблюдаемых во внутреннем объеме стальной эксплуатационной колонны при наличии источника колебаний в заколонном пространстве.

Методы

Исследования выполнены с применением эталонного гидрофона и широкополосного скважинного прибора на натурном макете скважины.

Background

The possibility of using passive acoustic noise logging in the study of operating wells is considered. Currently, there are several companies on the geophysical services market that offer to implement the method of broadband wellbore noise logging for solving practical problems in wells of various categories.

Aims and Objectives

Lab experimental study devoted to investigating the nature of acoustic noise spectral characteristics disturbance in a wellbore mockup with steel casing in presence of the acoustic source behind the casing.

Methods

The study is performed using the reference high-accuracy hydrophone and a wide frequency band wellbore logging tool at a close to real scale lab wellbore mockup.

Результаты

Установлен факт возникновения резонансных явлений во внутреннем объеме стальной колонны и эффект искажения исходного сигнала с учетом индивидуальных характеристик скважинного прибора.

Results

It is established the fact that acoustic resonances appear inside the casing volume with respective disturbances of the original signal that are also affected by the parameters of the specific wellbore tool.

Ключевые слова: скважина; шумометрия; гидрофон; спектральные характеристики; резонанс; скважинный прибор

Key words: wellbore; acoustic noise logging; hydrophone; spectral characteristics; resonance; wellbore tool

Введение

Первые публикации о возможности использования пассивной акустической шумометрии при исследовании действующих скважин относятся к 70-80 гг. прошлого столетия [1-3]. В частности, авторы [3] указали на идентичность спектральных характеристик шумов однофазного фильтрационного потока в пластовых и лабораторных условиях. Однако отсутствие надежной скважинной аппаратуры, ограниченные возможности анализа исходного сигнала в связи с применением аналоговой системы передачи информации, а также «ручной» алгоритм регистрации и визуализации полевых данных существенно ограничивали широкое внедрение метода.

В связи с появлением современной аппаратуры с цифровой регистрацией данных в энергонезависимой памяти открылась перспектива более глубокого анализа результатов промыслово-геофизических исследований (ПГИ) с применением компьютерной обработки в широком диапазоне частот. В связи с этим, активизировались и работы по изучению природы возникновения акустических шумов в горных породах [4-6], а также влияния скважинных эффектов на амплитудно-частотную характеристику регистрируемого шума [7]. В настоящее время на рынке гео-

физических услуг присутствуют несколько компаний, предлагающих к внедрению метод широкополосной скважинной шумометрии для решения практических задач в скважинах различных категорий.

Конструкция стенда и средства измерения

Учитывая перспективу развития метода в будущем и необходимость более детального изучения факторов, влияющих на характер шумового поля в условиях скважины, на кафедре геофизики Башкирского государственного университета совместно с Московским научно-исследовательским центром «Шлюмберге» начаты работы по изучению влияния конструкции скважины на акустическое поле, регистрируемое внутри эксплуатационной колонны.

Исследования проводятся на специально разработанном стенде, моделирующем участок ствола скважины с группой излучателей, распределенных на внешней поверхности стальной колонны (рисунок 1). Основная цель работы - оценка достоверности результатов измерения спектральных характеристик акустического поля в стволе скважины. Исследования выполнены с применением эталонных гидрофонов и промышленных скважинных приборов (шумомеров).

В работе использован эталонный гидрофон Brüel & Kjær 8104, а также промышленная скважинная аппаратура российских производителей, используемая при проведении ПГИ на скважинах.

Конструкция стенда включает в себя следующие основные элементы.

Стальная колонна с наружным диаметром 146 мм, общей длиной 2000 мм и толщиной стенок 7 мм. Нижний торец колонны заглушен, внутренний объем заполнен водой.

Стальная колонна установлена внутри герметичной пластиковой емкости, общей высотой превышающую высоту колонны, которая опирается на специальную демпфирующую «подушку» из звукоизолирующего материала, что необходимо для изоляции от внешних шумов и вибраций.

Внутренние поверхности емкости оклеены звукоизолирующим материалом, а емкость заполнена однородным по гранулярному составу песком. Верхняя часть колонны перекрывается пластиковой крышкой с применением звукоизоляционных материалов.

Для генерирования упругих волн на внешней поверхности стальной колонны смонтированы излучатели на основе пьезоэлементов ЦТС-19.

Монтаж излучателей произведен согласно схеме, представленной на рисунке 2. Коммутация пьезоэлементов выполнена с возможностью их группового или одиночного использования в качестве излучателя или приёмника акустического сигнала, что обеспечивает прямой контроль их работы.

В связи с отсутствием надежной и общепринятой системы калибровки аппаратуры широкополосной шумометрии проведено выборочное сравнение трех скважинных приборов, изготовленных с применением идентичных компонентов одним изготовителем и используемых в производстве.

Исследования выполнены во всем диапазоне заявленных в паспорте частот с применением накладного излучателя, размещаемого непосредственно на сенсоре шумометров.

Результаты приведены на рисунке 3.

Рисунок 1. Схематическое изображение и реализация акустического стенда с основными его элементами

Рисунок 2. Схема расположения пьезокерамических элементов и их нумерация на акустическом стенде

Рисунок 3. Результат сопоставления АЧХ трех однотипных скважинных приборов в ходе эксперимента

Результаты эксперимента показали, что амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) приборов существенно отличаются несмотря на то, что использованы акустические датчики, изготовленные по единой схеме, а настройки предусилителей и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) идентичны.

На графике (рисунок 3) приведены данные по амплитуде регистрируемого сигнала с шагом выборки по частоте 125 Гц, полученные из непрерывного спектра. В ходе эксперимента не учитывалась АЧХ собственно излучателя, соответственно, полученный результат позволяет сопоставить приборы между собой, но не может претендовать на оценку количественных характеристик прибора по звуковому давлению.

В приведенном примере прибор № 3 отличается от приборов № 1 и № 2 пониженной чувствительностью во всем диапазоне частот, а также отсутствием локальных повышений чувствительности в области частот 6-8, 10-14 и 22-26 кГц, наблюдаемых на двух других приборах.

Таким образом, можно говорить, что единая АЧХ, нередко заявляемая производителем для всей линейки скважинной аппаратуры, не отражает истинных её характеристик, а алгоритм проверки на фиксированной частоте (1,0 кГц), практикуемый для ряда акустических приборов, не может быть распространён на весь частотный диапазон прибора.

Результаты экспериментов на стенде

Как было сказано выше, АЧХ скважинных приборов индивидуальны и результат измерения в реальной скважине будет зависеть от того, какой прибор был использован. Дополнительными факторами, влияющим на результат измерения спектра шумов в стволе скважины, являются радиальные резонансы и переотражения акустических сигналов во внутреннем объеме стальной колонны [7], а также сам корпус прибора, помещенный в скважину и вносящий неопределенность в исследуемое акустическое поле.

Изучение этих явлений проведено на макете скважины, когда тарированный сигнал генерировался на внешней стенке стальной колонны путем активации соответствующей группы пьезокерамических излучателей, а в ствол скважины последовательно опускались эталонный гидрофон Brüel & Kjær 8104 и скважинные приборы. В данном эксперименте сенсоры скважинных приборов № 1, № 2 и гидрофон находились на оси скважины - напротив центральной группы излучателей, закрепленных на внешней поверхности стальной колонны. Результаты АЧХ приведены на рисунке 4.

Как видим, на спектральных характеристиках акустических сигналов, зарегистрированных как гидрофоном, так и скважинными приборами, четко выделяются области повышенной интенсивности шумов в диапазоне 16-19 и 26-30 кГц, что может быть объяснено влиянием радиальных резонансов в стволе скважины [7]. Общая картина акустического сигнала, регистрируемая гидрофоном и приборами, сохраняется, однако на реакции скважинного прибора № 1 выделяется ярко выраженный максимум в диапазоне частот 28-30 кГц.

Аналогичные исследования проведены при задействовании излучателей, смещенных на 50 см выше относительно сенсора скважинного прибора, и гидрофона без изменения положения последних.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 5.

Цель данного эксперимента - оценить степень искажения спектра акустических шумов при удалении точки регистрации от источника.

Априори предполагалось, что с увеличением расстояния должна снизиться интенсивность высокочастотной составляющей при условии, что распространение акустического сигнала идет по водной среде.

Как и ожидалось, при смещении излучателя относительно приемника наблюдается существенное снижение амплитуды сигнала в области частот 10-20 кГц, обусловленное потерей энергии волны за счет увеличения расстояния, проходимого упругой волной.

Рисунок 4. Акустический сигнал, регистрируемый эталонным гидрофоном и скважинными приборами при одновременной работе центральной группы излучателей напротив приёмника

Рисунок 5. Акустический сигнал, регистрируемый эталонным гидрофоном и двумя скважинными приборами при одновременной работе излучателей, смещенных относительно приемника на 50 см

Однако ожидаемого снижения высокочастотной составляющей акустического шума в области частот выше 20 кГц по реакции эталонного гидрофона не отмечено, но есть существенное изменение распределения интенсивности по частотам с формированием серии локальных резонансов в области частот 25-30 кГц, которые отсутствуют на предыдущем примере.

Амплитуда и спектральная характеристика сигнала, регистрируемая двумя приборами, также существенно различаются.

Например, когда место положения прибора совпадает по глубине с положением излучателей (рисунок 4), по прибору № 1 наблюдается локальный максимум в области частоты ~ 28-30 кГц, который отсутствует на приборе № 2.

При смещении излучателей на 50 см локальный максимум на первом приборе исчезает, но он наблюдается по второму прибору в районе ~ 18-19 кГц. Такое существенное изменение спектра шумов по реакции двух приборов при сохранении идентичных внешних условий может быть обусловлено возникновением собственных резонансных колебаний в конструкции прибора или особенностями индивидуальных настроек чувствительности отдельного прибора.

Как и ожидалось, при смещении излучателя относительно приемника наблюдается существенное снижение амплитуды сигнала в области частот 10-20 кГц, обусловленное потерей энергии волны за счет увеличения расстояния, проходимого упругой волной.

По результатам экспериментальных работ было установлено, что спектральная характеристика шумов, наблюдаемая в стволе скважины, существенно зависит от взаимного расположения источника колебаний и приемного датчика.

Наблюдается значительное число резонансных гармоник, возникающих в стволе скважины и зависящих от конструкции прибо-

ра, расстояния от источника акустических колебаний до точки наблюдения, а также от геометрии внутреннего объема «акустической камеры», роль которой выполняет стальная колонна с прибором.

В данный момент отлаживается технология корректной калибровки скважинного прибора с применением эталонного излучателя, обеспечивающего значимый уровень сигнала в диапазоне низких (1-10 кГц) частот и в области резонансных частот скважины и используемых приборных комплексов (15-31 кГц).

Выводы

Разработан и изготовлен макет скважины, моделирующий акустический объем внутрискважинного пространства с возможностью генерации тарированных акустических шумов на внешней стенке стальной эксплуатационной колонны.

Проведено исследование спектра акустических шумов, наблюдаемых на оси скважины с применением эталонного гидрофона Brüel & Kjær 8104 и двух промышленных скважинных приборов.

Установлены наличие резонансных явлений в области частот выше 20 кГц во внутреннем объеме скважины и зависимость спектральной характеристики регистрируемого акустического поля от взаимного расположения излучателя и приемника.

По результатам совместного тестирования промышленного скважинного прибора и эталонного гидрофона показано, что результат наблюдения существенно зависит от конструктивных элементов скважинного прибора, а также от индивидуальных настроек его чувствительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке компании Шлюмберже.

Список литературы

1. McKinley R.M., Bower F.M., Rumble R.C. The Structure and Interpretation of Noise from Flow behind Cemented Casing // *Journal of Petroleum Technology*. 1973. Vol. 25. Issue 3. P. 329-338. DOI: 10.2118/3999-PA.
2. Коротаев Ю.П. Исследование и режимы эксплуатации скважин. М.: ВНИИЭгазпром, 1991. 74 с.
3. Николаев С.А., Овчинников М.Н. Генерация звука фильтрационным потоком в пористых средах // *Акустический журнал*. 1992. Т. 38. № 1. С. 114-118.
4. Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // *Геофизика*. 2004. № 2. С. 25-30.
5. Асланян А.М., Асланян И.Ю., Кантюков Р.Р., Минахметова Р.Н., Никитин Р.С., Сорока С.В. Внедрение отечественного программно-аппаратного комплекса спектральной шумометрии SNL на объектах нефтегазового комплекса России и зарубежных стран // *Газовая промышленность*. 2016. № 739. С. 19.
6. Sergeev S., Ryzhikov N., Mikhailov D. Laboratory Investigation of Sound Induced by Gas Flow in Porous Media // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 654-661. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.08.018.
7. Мутовкин Н.В., Михайлов Д.Н., Софронов И.Л. Анализ результатов моделирования акустических полей, возбуждаемых течением флюида в пласте // *Геомодель-2018: матер. конф. EAGE*. Геленджик: European Association of Geoscientists and Engineers, 2018. С. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802388.

Авторы

• Яруллин Айрат Рашидович, канд. техн. наук
Башкирский государственный университет
Доцент кафедры геофизики
Российская Федерация, 450076, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, 32
e-mail: Alarullin@bashedu.ru

References

1. McKinley R.M., Bower F.M., Rumble R.C. The Structure and Interpretation of Noise from Flow behind Cemented Casing. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, Vol. 25, Issue 3, pp. 329-338. DOI: 10.2118/3999-PA.
2. Korotaev Yu.P. *Issledovanie i rezhimy ekspluatatsii skvazhin* [Wells Exploration and Operation Modes]. Moscow, VNIIEgazprom Publ., 1991. 74 p. [in Russian].
3. Nikolaev S.A., Ovchinnikov M.N. Generatsiya zvuka fil'tratsionnym potokom v poristyykh sredakh [Sound Generation by a Filtrational Flow in Porous Media]. *Akusticheskii zhurnal - Acoustical Physics*, 1992, Vol. 38, No. 1, pp. 114-118. [in Russian].
4. Ipatov A.I., Gorodnov A.V., Ipatov S.I., Marenko N.N., Petrov L.P., Skopintsev S.P. Issledovanie amplitudno-chastotnykh spektrov signalov akusticheskogo i elektromagnitnogo shuma pri fil'tratsii flyuidov v porodakh [Study of the Amplitude-Frequency Spectra of Acoustic and Electromagnetic Noise Signals during Filtration of Fluids in Rocks] *Geofizika - The Russian Geophysics Journal*, 2004, No. 2, pp. 25-30. [in Russian].
5. Aslanyan A.M., Aslanyan I.Yu., Kanyukov R.R., Minakhmetova R.N., Nikitin R.S., Soroka S.V. Vnedrenie otechestvennogo programmno-apparatnogo kompleksa spektral'noi shumometrii SNL na ob'ektakh neftegazovogo kompleksa Rossii i zarubezhnykh stran [Implementation of the Domestic Software and Hardware Complex for Spectral Noise Measurement SNL at Oil and Gas Facilities in Russia and Foreign Countries]. *Gazovaya promyshlennost' - GAS Industry of Russia*, 2016, No. 739, pp. 19. [in Russian].
6. Sergeev S., Ryzhikov N., Mikhailov D. Laboratory Investigation of Sound Induced by Gas Flow in Porous Media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, Vol. 172, pp. 654-661. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.08.018.
7. Mutovkin N.V., Mikhailov D.N., Sofronov I.L. Analiz rezul'tatov modelirovaniya akusticheskikh polei, vzbuzhdaemykh techeniem flyuida v plaste [Analysis of Modeling of Acoustic Fields Excited by the Flow Noise in the Formation Inflow Zones]. *Materialy konferentsii EAGE «Geomodel'-2018»* [Materials of Conference EAGE «Geomodel 2018»]. Gelendzhik, European Association of Geoscientists and Engineers Publ., 2018, pp. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802388. [in Russian].

The Authors

• Yarullin Airat R., Candidate of Engineering Sciences
Bashkir State University
Assistant Professor of Geophysics Department
32, Zaki Validi str., Ufa, 450076,
Russian Federation
e-mail: Alarullin@bashedu.ru

• Яруллин Рашид Камилевич, канд. физ.-мат. наук, доцент
Башкирский государственный университет
Директор Инновационного центра «Технопарк»
Российская Федерация, 450076, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, 32
e-mail: rk@geotec.ru

• Yarullin Rashid K., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor
Bashkir State University
Director of Tekhnopark Innovation Center
32, Zaki Validi str., Ufa, 450076,
Russian Federation
e-mail: rk@geotec.ru

• Валиуллин Рим Абдуллович, д-р техн. наук, профессор
Башкирский государственный университет
Заведующий кафедрой геофизики
Российская Федерация, 450076, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, 32
e-mail: valra@geotec.ru

• Valiullin Rim A., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Bashkir State University
Head of Geophysics Department
32, Zaki Validi str., Ufa, 450076,
Russian Federation
e-mail: valra@geotec.ru

• Михайлов Дмитрий Николаевич, канд. физ.-мат. наук
Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже
Старший научный сотрудник
Российская Федерация, 125171, г. Москва,
Ленинградское шоссе, 16А-3
e-mail: DMikhailov2@slb.com

• Mikhailov Dmitriy N., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Schlumberger Moscow Research Center
Senior Researcher
16A-3, Leningrad highway, Moscow, 125171,
Russian Federation
e-mail: DMikhailov2@slb.com

• Шако Валерий Васильевич
Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже
Эксперт департамента добычи
Российская Федерация, 125171, г. Москва,
Ленинградское шоссе, 16А-3
e-mail: VShako@slb.com

• Shako Valeriy V.
Schlumberger Moscow Research Center
Expert of Production Department
16A-3, Leningrad highway, Moscow, 125171,
Russian Federation
e-mail: VShako@slb.com