

Мощный внутрискважинный источник нового типа

Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Малеханов А.И., Марышев А.П., Таланов В.И., Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород

В Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) разработана конструкция и технология создания мощного источника нового типа для генерации сейсмических волн в широком диапазоне $\sim 40 - 400$ Гц. Основным элементом источника является пьезокерамический цилиндр, совершающий в скважине изгибные колебания. Аналитическая и численная модели излучателя показывают, что большая часть энергии излучения идет на возбуждение сдвиговых волн в окружающих скважину породах. Приведены результаты натурных испытаний макета источника, на основе которых выполнены оценки мощности излучателя, его к.п.д. и добротности.

Введение

Одной из актуальных и в значительной степени нерешенных проблем прикладной геофизики представляется разработка внутрискважинных излучателей, обладающих как высокой мощностью, так и широкими возможностями управления и синхронизации излучаемых сигналов в диапазоне относительно низких частот от ~ 10 до ~ 1000 Гц. Можно ожидать, что подобные излучатели способны найти широкое применение в качестве эффективных инструментов дистанционной диагностики структуры земных пород с высоким разрешением. Возможность длительного накопления когерентных сигналов и применения специальных процедур корреляционного анализа открывает перспективу существенного увеличения глубины (дальности) зондирования для заданного уровня излучаемой мощности. Мощные источники низкочастотных сейсмических волн могут быть использованы и для осуществления воздействия на состояние пород, в частности, при промышленном освоении нефтяных месторождений.

Известные и применяемые на практике внутрискважинные источники в принципе не удовлетворяют совокупности подобных требований, поскольку оказываются либо высокочастотными (в диапазоне $\sim 10-30$ кГц) [1-3], либо относительно маломощными в нужном диапазоне (как, например, параметрические преобразователи [4]), либо некогерентными источниками ударного типа (как, например, электроискровые [7] или газодинамические [6] источники). Отметим при этом, что широко используемые наземные низкочастотные вибраторы [7] также имеют существенные недостатки в плане реализации когерентных подходов в задачах сейсмоакустического зондирования. Помимо низкого коэффициента передачи мощности излучения в объемные Р-волны, они обладают весьма ограниченными возможностями управления режимами излучения и формирования длительных когерентных посылок (это обусловлено, в том числе, неконтролируемыми изменениями свойств грунта под действием интенсивных вибраций).

Сложность разработки мощных низкочастотных внутрискважинных излучателей заключается в ограниченности их поперечного размера, который не может превышать внутренний диаметр скважины (как правило, $10-20$ см). В таких условиях одним из эффективных решений является генерация излучателем изгибных

колебаний, передача которых через заполняющую скважину жидкость на стенки обсадной колонны приводит к излучению преимущественно поперечных S-волн в окружающее скважину пространство. При этом частотный диапазон излучения может быть снижен до сотен и даже десятков герц, что указывает на перспективы использования такого источника для акустического воздействия и межскважинного зондирования на дистанциях ~ 1 км и более.

Первый опытный образец мощного изгибного низкочастотного внутрискважинного излучателя, созданный в ИПФ РАН по заказу ОАО «СибИНКОР» (г. Тюмень), прошел успешные испытания осенью 1999 года на Самотлорском месторождении Нижне-Вартовского бассейна [8]. На базе этого прототипа в ИПФ РАН по заказу компании Shell International (Нидерланды) был разработан и создан модифицированный вариант изгибного излучателя [9]. В данной статье кратко описан принцип его работы и представлены некоторые результаты натурных испытаний.

Принцип работы и математическая модель излучателя

Основным элементом излучателя является пьезокерамический цилиндр, совершающий изгибные колебания в скважине заполненной водой. Предполагается, что толщина слоя жидкости R между излучающим цилиндром и стальной обсадной трубой, образующей внешнюю границу скважины, существенно меньше радиуса цилиндра R . Колебания цилиндра через воду передаются обсадной трубе, движения которой в конечном итоге приводят к излучению сейсмических волн в затрубное пространство, как это схематически показано на рис. 1.

Излучающий цилиндр составлен из одинаковых пьезокерамических шайб, одна из которых показана на рис. 2. С одной стороны шайбы (сторона А) имеются 2 электрода, разделенные изолирующей полосой, а вся другая сторона (сторона Б) покрыта одним электродом. Шайбы объединяются в пары таким образом, что их стороны А совпадают. На все стороны типа Б подается нулевой потенциал, а на разные электроды на сторонах типа А подаются потенциалы $+V$ и $-V$. В результате одна половина керамического столба сжимается, а другая — расширяется. Периодические изменения напряжения V вызывают изгибные колебания цилиндра как целого.

Численное моделирование работы источника выполнялось методом конечных элементов с использованием многоцелевого программного пакета ANSYS [10]. Конечнo-элементная модель излучателя в воздухе показана на рис. 3. Кроме излучающего цилиндра 1 она включает аппаратный контейнер 2, амортизатор 3 и подвесное устройство (подвес) 4, с помощью которого излучатель крепится к колонне труб, используемой для спуска его в скважину.

Для анализа работы излучателя в скважине, заполненной водой, была использована более сложная модель. Излучатель, показанный на рис. 3, размещался внутри заполненной водой

ВО ВНУТРЕННИХ ТОЧКАХ СРЕДЫ...
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

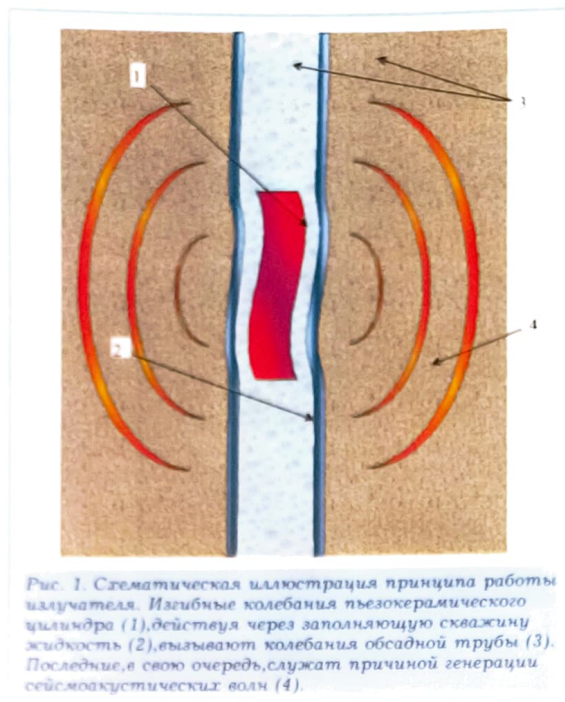


Рис. 1. Схематическая иллюстрация принципа работы излучателя. Изгибные колебания пьезокерамического цилиндра (1), действуя через заполняющую скважину жидкость (2), вызывают колебания обсадной трубы (3). Последние, в свою очередь, служат причиной генерации сейсмоакустических волн (4).

обсадной колонны. Последняя, в свою очередь, была помещена внутри цилиндрического объема окружающего однородного грунта высотой 36 м и радиусом 18 м. В элементах, моделирующих грунт, вводилось поглощение. Вблизи излучателя поглощение было очень большим, но оно резко возрастало по мере приближения к границе объема, занятого грунтом. Это было сделано для максимального ослабления отраженных от границы волн. Введение такого ослабления позволяет моделировать работу излучателя в безграничном пространстве.

Поскольку длина излучающего цилиндра l существенно больше его радиуса R , колебания излучателя можно приближенно описать аналитически, пользуясь приближением тонкого стержня [13]. В этом приближении частоты собственных изгибных колебаний цилиндра в воздухе выражаются формулой

$$f = \frac{\gamma}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{q}{m}} \quad (1)$$

где m — масса на единицу длины цилиндра, q — момент инерции поперечного сечения цилиндра. Значения числового коэффициента для первых трех мод изгибных колебаний соответственно

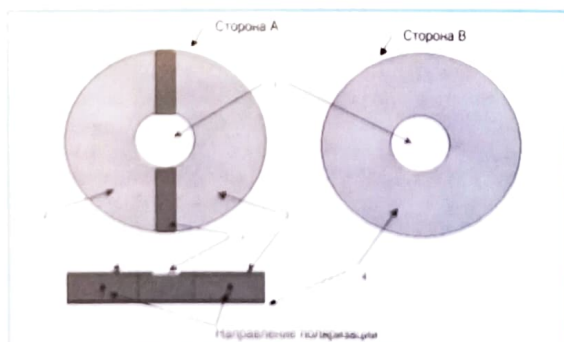


Рис. 2. Пьезокерамическая шайба: 1 — центральное отверстие; 2 — первый секционированный электрод; 3 — второй секционированный электрод; 4 — сплошной электрод; 5 — изолирующая полоса.

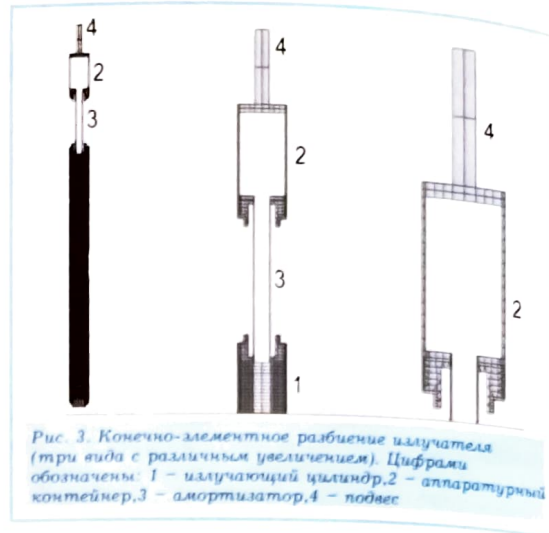


Рис. 3. Конечно-элементное разбиение излучателя (три вида с различным увеличением). Цифрами обозначены: 1 — излучающий цилиндр, 2 — аппаратный контейнер, 3 — амортизатор, 4 — подвес

равны 22,4, 61,7 и 120,9

Анализ показывает, что колебания цилиндра в заполненной водой скважине описываются неожиданно просто — с помощью практически тех же формул, которые определяют колебания цилиндра в воздухе. Влияние воды и границ скважины осуществляется простым добавлением присоединенной массы жидкости к собственной массе излучателя. Величина присоединенной массы на единицу длины цилиндра при $R \ll R_0$ определяется формулой

$$\mu = \pi R_0^2 \frac{\rho_a}{\Delta R} \quad (2)$$

где ρ_a — плотность воды. Резонансные частоты излучающего цилиндра в данной модели, по-прежнему, задаются формулой (1) с заменой m на $m + \mu$.

В макете излучателя, об испытании которого пойдет речь далее, излучающий цилиндр имел длину $l = 2,04$ м и радиус $R = 0,073$ м. Масса цилиндра на единицу длины была $m = 99,8$ кг/м, а ширина слоя воды между цилиндром и обсадной трубой в нашем эксперименте равнялась $\Delta R = 4$ мм. Оценка присоединенной массы по формуле (2) дает значение $\mu = 314,2$ кг/м. Таким образом, учет присоединенной массы увеличивает эффективную массу цилиндра в 4 раза. Согласно (1) это означает, что при помещении излучателя в скважину, его резонансные частоты уменьшаются в два раза.

Первые три моды изгибных колебаний излучателя показаны на рис. 4. Их частоты приведены в Табл. 1. Численное моделирование показало, что добавление аппаратного блока, амортизатора и подвеса приводит, помимо изменения резонансных частот мод излучающего цилиндра, к расщеплению второй моды на две парциальные моды с близкими формами колебаний, но разными резонансными частотами. По этой причине во второй и третьей строках Табл. 1 указаны по две резонансные частоты для второй моды (чтобы подчеркнуть близость

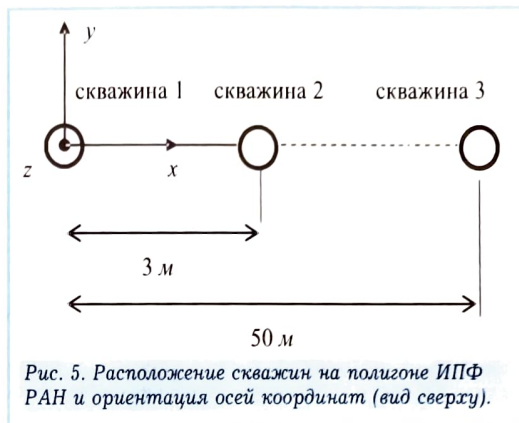
Таблица 1. Резонансные частоты мод излучателя в скважине заполненной, водой ($\Delta R = 4$ мм)

Номер моды	1	2	3
По формуле (1), f (Гц)	60	166	326
ANSYS, f (Гц)	49	110; 186	300
измерения, f (Гц)	49	112; 185	285



х, направленной вдоль прямой линии, проходящей через все три скважины. Соответственно, ось u лежит в горизонтальной плоскости перпендикулярно x .

Работа источника исследовалась в широком диапазоне частот от 20 до 500 Гц. Излучались длинные широкополосные ЛЧМ-сигналы с



длительностью одного импульса 25,6 с. В каждом режиме излучения проводились две серии измерений. В одной из них излучатель колебался в плоскости $u-z$, в другой — в плоскости $x-z$. Смена ориентации излучателя выполнялась его поворотом вокруг оси на 90°. Для исследования пространственной структуры поля излучателя производились замеры вертикальных разрезов поля с помощью геофона, помещаемого в измерительные скважины 2 или 3. Регистрировались три компонента ускорения (x , u и z) в диапазонах глубин от 0 до 13,5 м в скважине 2, и от 3 до 15 м в скважине 3. Амплитуды смещений в направлениях x и u , полученных путем пересчета регистрируемых геофоном компонент ускорения, будем обозначать символами s_x и s_u , соответственно.

Ниже приведены некоторые результаты измерений, выполненных в режиме оптимального возбуждения второй моды. Действующая величина подаваемого на рабочие секции напряжения составляла 270 В.

На рис. 6 в качестве примера показаны смещения s_x и s_u , зарегистрированные в скважине 2 на глубине 12 м. Поскольку при излучении ЛЧМ-импульса каждому моменту времени отвечает своя мгновенная частота, на этом рисунке по оси абсцисс вместо времени отложена мгновенная частота. Представленные здесь результаты получены в опыте с излучателем, колеблющимся в плоскости $u-z$, поэтому амплитуда смещения в направлении оси u заметно превышает амплитуду смещений в направлении оси x . Видно также, что вследствие использования режима оптимального возбуждения второй моды (режима 2), появляются максимумы излучения на частотах 110 Гц и 180 Гц — резонансных частотах расщепленной второй моды (см. Табл. 1). Обратим также внимание на широкий максимум на резонансной частоте третьей моды 280 Гц, которая тоже возбуждается в этом режиме, хотя и менее эффективно.

Более подробная картина поля в том же режиме излучения показана на рис. 7, где изображено пространственно-частотное распределение компоненты s_u (компонента s_x

собственных функций этих парциальных мод, обе из них мы называем вторыми).

Анализ результатов моделирования показывает, что резонансные частоты и формы мод слабо зависят от свойств грунта. Это позволяет выработать некоторые «универсальные» рекомендации по оптимальному возбуждению отдельных мод. Обратим внимание на то обстоятельство, что форма каждой моды характеризуется последовательностью участков с кривизной разного знака. Смена знака происходит в точках нулевой кривизны, которые расположены вблизи узлов моды. На участке цилиндра с кривизной одного знака все половинки пьезокерамических шайб, лежащие по одну сторону от плоскости симметрии излучающего цилиндра, ведут себя одинаково — одновременно сжимаются или одновременно расширяются. Именно это соображение лежит в основе идеи секционирования излучателя, то есть разбиения излучателя на отдельные рабочие секции. Границы секций подобраны таким образом, что они находятся вблизи узлов второй и третьей мод. Для оптимального возбуждения нужной моды знаки напряжений, подаваемых на различные секции, следует подбирать таким образом, чтобы под влиянием пьезоэлектрических сил цилиндр «стремился» изгибаться, повторяя форму моды. Натурные испытания подтвердили, что такое секционирование излучателя позволяет существенно повысить его эффективность.

Результаты испытаний излучателя

Для тестирования излучателя на испытательном полигоне ИПФ РАН были пробурены и оборудованы три одинаковых скважины глубиной 20 м, расположение которых показано на рис. 5. Каждая скважина обсажена стальной трубой диаметром 168 мм. Излучатель располагался в скважине 1 (его центр был на глубине 11 м), а приемная аппаратура помещалась в одной из двух других скважин. Все три скважины были залиты водой. На основании анализа проб грунта, полученных при бурении скважин, были сделаны грубые оценки средней плотности грунта на полигоне ρ_g , средней скорости продольных сейсмических волн c_p и средней скорости поперечных волн c_s : $\rho_g = 1730 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 550 \text{ м/с}$ и $c_s = 280 \text{ м/с}$.

При описании результатов измерений мы пользуемся декартовой системой координат с осью z , направленной вертикально вверх, и осью

ВО ВНУТРЕННИХ ТОЧКАХ СРЕДЫ... ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

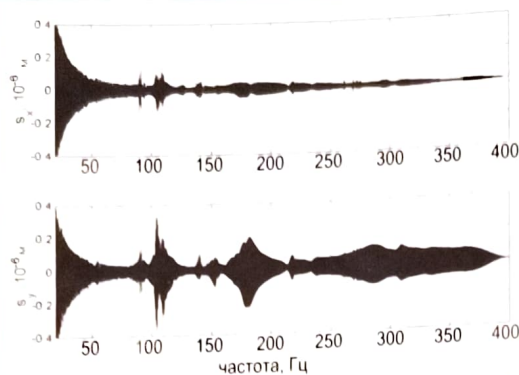


Рис. 6. Измеренные компоненты вектора смещения вдоль оси x (вверху) и y (внизу) как функции частоты излучения. Излучатель колеблется в плоскости $y-z$ в режиме излучения моды 2.

имеет аналогичное распределение) на расстоянии 3 м от источника в скважине 2. Хорошо видны те же максимумы поля на частотах в области 110 и 180 Гц. На большем расстоянии от источника (в скважине 3) распределение компонент поля становится более сглаженным по обеим осям.

Для анализа угловой структуры излученного поля в вертикальной плоскости было выполнено пространственное Фурье-преобразование поля, зарегистрированного в скважине 2. На рис. 8 по оси абсцисс вместо пространственной частоты отложен соответствующий ей угол скольжения. Видно, что максимальное излучение наблюдается на частотах, близких к 180 Гц — одной из резонансных частот второй моды. Волны с максимальной интенсивностью распространяются под углом скольжения $\chi \approx 40^\circ$.

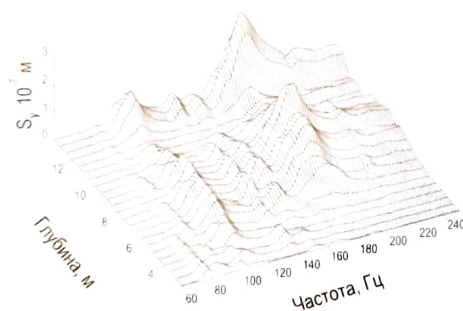


Рис. 7. Зависимость от глубины и частоты компоненты вектора смещения вдоль оси y в скважине 2 (3 м от источника). Излучатель колеблется в плоскости $y-z$ в режиме излучения моды 2.

Отметим, что с ростом частоты углы скольжения волн в среднем уменьшаются, что вполне естественно. Действительно, с увеличением частоты увеличивается волновое число $k_s = \omega/c_s$, k , отвечающая максимуму спектра, от ω не зависит, поэтому угол скольжения $\chi = \arcsin(k/k_s)$ с ростом ω уменьшается.

Аналогичные результаты были получены в опытах с излучателем, «настроенным» на эффективное возбуждение третьей моды. В этом случае, в соответствии с теоретической оценкой,

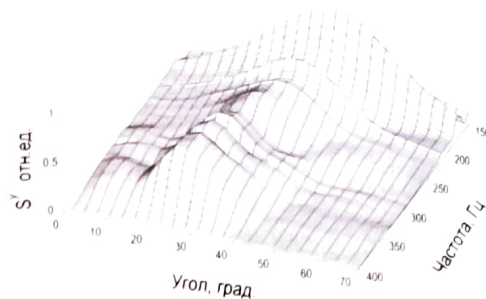


Рис. 8. Частотно-угловое распределение поля в вертикальном сечении на дистанции 3 м от источника (скважина 2). Излучатель колеблется в плоскости $y-z$ в режиме излучения моды 2.

наиболее эффективно возбуждались волны на частотах в области 280 Гц. Максимум углового спектра излучения отвечает в этом случае углу скольжения $\chi \approx 30^\circ$.

Данные измерений вертикальных сечений поля в приемных скважинах 2 и 3 позволили грубо оценить излучаемую мощность. Считая регистрируемые волны квазиплоскими, мы воспользовались известной формулой, согласно которой плотность потока энергии в плоской сдвиговой волне, бегущей в направлении оси x (частицы среды при этом колеблются вдоль оси y) равна:

$$G_x = \frac{\omega^2 \rho c_s}{2} |u_y|^2, \quad (3)$$

где ω — угловая несущая частота, ρ — плотность среды, c_s — скорость сдвиговых волн, u_y — комплексная амплитуда смещения частиц (при рассмотрении волн, распространяющихся под углом к оси x , формула (3) модифицируется очевидным образом). Кроме того, мы предполагали, что зависимость амплитуды смещения в горизонтальной плоскости от азимутального угла θ выражается множителем $\cos(\theta)$. Пользуясь формулой (3) и экспериментальными данными, мы проинтегрировали вектор плотности потока энергии по цилиндрическим поверхностям радиусами 3 и 50 м, окружающим излучатель, и тем самым оценили потоки энергии через данные поверхности. Из их сравнения были получены оценки коэффициентов затухания сейсмических волн и полной излучаемой мощности. Наконец, принимая во внимание тот факт, что увеличение подаваемого напряжения в n раз приводит к увеличению излучаемой мощности в n^2 раз, мы сделали прогностическую оценку излучаемой мощности в случае подаваемого на излучатель напряжения 1 кВ.

Оказалось, что при работе на резонансной частоте второй моды $f = 180$ Гц излучаемая мощность составляет 207 Вт. Коэффициент затухания волн в грунте на этой частоте примерно составил 1,2 дБ/λ (λ — длина волны). При работе на резонансной частоте третьей моды $f = 280$ Гц для излучаемой мощности была получена оценка 1250 Вт, а для коэффициента затухания — 1,3 дБ/λ. Отметим, что приведенные

оценки мощности являются несколько заниженными, так как измерения вертикального сечения поля проводились лишь до глубины 14 м и никак не учитывался вклад волн, распространяющихся ниже этой отметки.

Для рабочей частоты 280 Гц была получена также экспериментальная оценка к.п.д. источника, которая составила 60% (от потребляемой им электрической мощности). Это указывает на высокую эффективность источника.

Наконец, при анализе максимумов ДЧМ-сигналов, зарегистрированных в скважине 2, были получены оценки добротности колебаний излучателя $q = f/\Delta f$ на резонансных частотах трех изгибных мод (здесь символом f обозначена ширина полосы излучения по уровню 3 дБ):

мода 1: $f = 48,5$ Гц, $\Delta f = 1,2$ Гц, $q = 40$;

мода 2: $f = 180$ Гц, $\Delta f = 9$ Гц, $q = 20$;

мода 3: $f = 280$ Гц, $\Delta f = 25$ Гц, $q = 11$.

Заключение

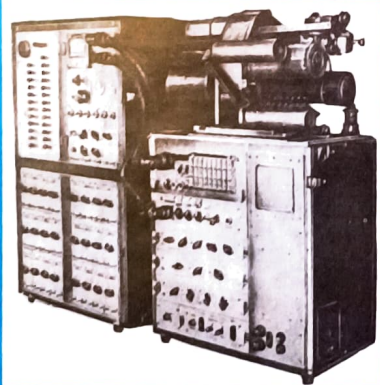
Натурные испытания макета секционированного скважинного излучателя на скважинном полигоне ИПФ РАН подтвердили работоспособность и эффективность предложенной конструкции. Экспериментально показана возможность излучения таким источником мощных сдвиговых волн в широком диапазоне частот от 40 до 400 Гц как на отдельных резонансных частотах изгибных колебаний, так и в относительно широких частотных полосах в верхней части данного диапазона. Отличительной и выигрышной особенностью нового излучателя является полностью электронное управление режимами формирования сигналов, что обеспечивает высокую долговременную стабильность зондирующих сигналов (ограниченную, фактически, только стабильностью задающих генераторов) и позволяет использовать сложные ЧМ- и ФМ-сигналы в целях межскважинного зондирования земных пород с

высоким пространственным разрешением. Мощность излучения опытного образца достигает величины ~ 1 кВт при значении к.п.д. 60%. Добротность резонансов излучателя различна и варьирует в пределах от 11 до 40 для разных мод. Разбиение излучающего цилиндра на несколько рабочих секций, питание которых осуществляется независимо, позволяет оптимальным образом возбуждать различные моды излучателя. Это дает дополнительные возможности по согласованию параметров излучателя с окружающей средой и управлению пространственными характеристиками излучения.

Литература

- 1 Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
- 2 Александров В.А., Железный В.Б., Казаков Ю.В., Островский Д.Б. Опыт и перспективы использования гидроакустических технологий для обработки и исследования скважин // Каротажник. 2003. № 107. С. 23-34.
- 3 Митрофанов В.П., Дзюбенко А.И., Терентьев Б.В., Пузиков В.И., Дрягин В.В. Использование магнитострикционных источников акустической энергии для повышения нефтеотдачи // Каротажник. 1998. № 45. С. 25-32.
- 4 Александров В.А., Железный В.Б., Жуков В.Б., Майоров В.А., Островский Д.Б. Управляемое параметрическое акустическое воздействие на продуктивную зону нефтяных и газовых скважин // Геофизика. 1999. № 5. С. 30-39.
- 5 Калинин В.В., Владов М.Л., Алтикаев С.Ф., Бухов В.М., Ногин В.А. Сейсмическое поле, генерируемое электрическими разрядами в скважинах // Геофизика. 2003. № 5. С. 29-39.
- 6 Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Будков А.М., Свинцов И.С. Новый сейсмический источник и некоторые перспективы его применения // Геофизика. 2003. № 6. С. 17-24.
- 7 Теория и практика невязрывной наземной сейсмозазведки / Под ред. Шнейерсона М.Б. – М.: Недра, 1998. – 528 с.
- 8 Бриллиант Л.С., Боголюбов Б.Н., Цыкин И.В., Лобанов В.Н., Новиков В.Ф., Морозов В.Ю., Потапов Г.А., Рамазанов Д.Ш., Сашнев И.А. Опытно-промышленные испытания мощного низкочастотного излучателя для интенсификации добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2000. № 9. С. 86.
- 9 Авербах В.С., Артецкий В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Марышев А.П., Таланов В.И. Мощный внутрискважинный источник сейсмоакустических волн // Акуст. журн. 2005. Т. 51. Приложение. С. 31-45.
- 10 Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер Пресс, 2002.
- 11 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Физматлит, 2001.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ



Сейсмозазведочная станция СМ-24 была разработана СКБ сейсмического приборостроения (г. Саратов) в 1966 г. Серийный выпуск начал в 1969 г. на заводе "Нефтеприбор" (г. Москва). За период с 1969 г. по 1979 г. было выпущено более полусотни станций СМ-24.

24-х канальная сейсмозазведочная станция СМ-24 была предназначена для ведения разведки МОВ в сложных сейсмологических, климатических и дорожных условиях. Станция могла работать как в режиме обычной 24-х канальной станции, так и в режиме накопителя слабых возбуждений (до 16 воздействий). Отличительными особенностями станции являлись:

1. Все электронные схемы были выполнены с использованием транзисторов и конструктивно

оформлены в виде плат печатного монтажа, что обеспечивало чрезвычайно высокую надежность при эксплуатации.

2. Общий динамический диапазон канала записи станции был равен 120 дБ. Из них 70 дБ регулировалось АРУ с записью кривой изменения усиления на ленту, а 50 дБ регистрировались на ленту без преобразования.

3. Станция состояла из двух блоков по 40 кг каждый.

4. Станция потребляла в режиме записи 70 Вт от 2-х аккумуляторных батарей.

Станция СМ-24 широко использовалась при проведении сейсмозазведочных работ как в СССР, так и за рубежом.

ЭКСПОНАТ № 02/2006