Электронный журнал «Техническая акустика»
http://webcenter.ru/~eeaa/ejta/

2004, 10

Д. А. Касьянов[1], Г. Е. Фикс[2], Г. М. Шалашов[1]

[1]*Радиофизический институт (НИРФИ), 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печёрская, 25, e-mail: kasd@nirfi.sci-nnov.ru*
[2]*Институт прикладной физики РАН (ИПФРАН), 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

Дифракционный способ фокусирования акустических полей, создаваемых протяжёнными скважинными антеннами

Получена 21.03.2004, опубликована 18.08.2004

В работе рассматривается один из способов реализации фокусирующих скважинных антенн, когда фокусирование акустического поля обеспечивается дифракцией. Особое внимание уделено методам разбиения цилиндрической апертуры на зоны с противофазным возбуждением для создания цилиндрической зонной линзы. Показано, что кроме классического варианта разбиения на зоны Френеля существует альтернативный способ. Исследуются особенности распределений упругих полей в массиве, создаваемых различными зонными линзами. Обсуждается применимость фокусирующих скважинных антенн, выполненных в виде зонных линз, в геотехнологиях.

ВВЕДЕНИЕ

В современных скважинных геотехнологиях, таких как газо-нефтедобыча, подземное выщелачивание, подземное растворение солей и т. д., всё чаще для интенсификации используются акустические поля. Большинство методов и подходов к этой проблеме обобщено в [1]. Механизмы действия полей упругих колебаний на процессы переноса в многофазных средах изучены явно недостаточно, и с уверенностью можно говорить лишь о некоторых общих закономерностях. Тем не менее, требования к акустическим скважинным излучателям, предназначенным для использования в конкретном геотехнологическом цикле, можно сформулировать достаточно чётко. Важнейшим требованием, безусловно, является создание необходимых для интенсификации амплитуд упругих полей в заданном месте обрабатываемой среды на заданных частотах, так как именно от амплитуды поля и частоты воздействия, в основном, зависит эффективность интенсификации.

Основными факторами, ограничивающими интенсивность поля в прискважинной зоне, являются затухание упругих полей в массиве и не оптимальность излучения акустического поля из скважины. С затуханием в массиве практически ничего нельзя поделать, кроме использования, обычно весьма ограниченных, возможностей в понижении частоты излучения. Совершенствовать же разного рода процессы,

связанные с излучением из скважины, можно достаточно эффективно, причём несколькими способами. Первый путь — это увеличение удельной мощности излучателя. Здесь, правда, существуют ограничения, связанные, с одной стороны, с механической прочностью активных материалов, их нелинейностью и собственными потерями, с другой — кавитационной прочностью внутрискважинной жидкости и условиями согласования излучателя с обрабатываемой средой.

Другой путь увеличения интенсивности упругих полей в прискважинной зоне связан с формированием там соответствующих распределений акустического поля. Действительно, геометрия скважины позволяет разместить в ней лишь точечный или линейный акустический источник. Естественно, речь идёт о звуковом диапазоне частот или самом начале ультразвукового. Акустические поля, создаваемые точечным источником, имеют сферическую расходимость, где интенсивность падает обратно пропорционально квадрату расстояния, что существенно ограничивает область действия акустического поля. Линейные источники, распределённые вдоль оси скважины, создают поля, имеющие цилиндрическую расходимость, интенсивность при этом падает обратно пропорционально расстоянию, что несколько расширяет область действия акустического поля. Оказывается, кроме того, можно попытаться скомпенсировать цилиндрическую расходимость, характерную для линейной антенны [2, 3]. Достигается это с помощью фокусирующих фазовых распределений, создаваемых вдоль образующей антенны. В результате конкуренции цилиндрической расходимости по одной координате и сходимости по другой образуется фокальная область в виде тора, положением которой, при определённых условиях, можно управлять [3]. Теория подобных антенн, излучающих в безграничную среду, представлена в [4 – 6], первое применение в геотехнологических целях описано в [2, 3].

О ФОКУСИРУЮЩИХ ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ

Фокусирующие фазовые распределения вдоль образующей линейной антенны могут быть как квазинепрерывными, так и дискретными. Под квазинепрерывными будем понимать классические фокусирующие распределения: сферическое, параболическое и т. д., а фокусирование акустического поля с помощью подобных распределений будем называть фазовым. Примером дискретных распределений являются зонные линзы и пластинки [4, 7 – 9]. Подобный способ фокусирования с помощью дискретных структур, вслед за [8], будем называть дифракционным.

Известно, что по фокусирующим свойствам зонные системы не могут конкурировать с системами с квазинепрерывным распределением фазы. Для плоского случая в [9] показано, а в [10] экспериментально подтверждено, что в классической задаче при падении плоской волны на систему колец, в случае, если они образуют зонную пластинку, в фокусе собирается в π^2 раз меньше энергии, чем падает, а если кольца образуют линзу – в $\pi^2/4$ раз меньше. В случае цилиндрических волн [4] соотношения примерно такие же.

Существенным достоинством зонных структур оказывается простота исполнения, что особенно важно в случае излучающих акустических систем, например, в скважинной геоакустике. Действительно, создание квазинепрерывных фазовых распределений целесообразно только в приёмных антеннах, а в излучающих силовых антеннах этот путь наталкивается на часто непреодолимые сложности в создании линий задержки с устойчивыми параметрами, способных пропускать большие мощности, особенно если антенны предназначаются для работы в жёстких условиях (высокие давления и температуры). Если же фокусирующая антенна изготавливается в виде зонной линзы, то дополнительных фазовращающих элементов не требуется. Антенна по определённому закону [4] разбивается на зоны, и активные элементы, находящиеся в соседних зонах, запитываются в противофазе. Кроме того, положением фокуса у зонных линз можно управлять, изменяя частоту излучения. Возможности перестройки ограничиваются лишь добротностью преобразователей, из которых состоит антенна и условиями согласования системы «антенна – скважина – массив» [11, 12].

Зонные линзы обладают ещё одной замечательной особенностью: их фокусирующие свойства сохраняются при изменении характеристик окружающей среды, например, изменение продольной скорости звука в массиве будет означать для скважинной линзы с заданными габаритами лишь изменение её фокусного расстояния [4, 9].

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗОННЫХ ЛИНЗ

При создании фокусирующих скважинных антенн, которые, например, были использованы для интенсификации процесса подземного выщелачивания [2, 3], применялось простое геометрическое правило: активные элементы объединялись в группы (зоны) таким образом, чтобы выполнялось приближённое равенство $h_n \approx \sqrt{(n-1/4)\lambda_l F}$, где h_n — координата вдоль образующей антенны, соответствующая концу n-й зоны Френеля, λ_l — длина продольной волны в массиве, F — фокусное расстояние. Схема разбиения апертуры антенны на зоны показана на рис. 1. Антенны собирались из пьезокерамических цилиндров, для упрощения коммутации в соседних зонах использовались цилиндры с противоположной поляризацией. Оценки для амплитуд упругих полей, создаваемых разработанными антеннами, даны в [11 – 13].

Однако приведённое выше равенство не является единственным правилом, по которому можно создать фокусирующее зонно-линзовое распределение на цилиндрической апертуре. Оказывается, можно не заполнять полностью всю апертуру скважинной фокусирующей антенны акустическими преобразователями и получить коэффициенты усиления близкие к характерным для зонной линзы. Технологически это будет выглядеть следующим образом: из выбранного типа акустических преобразователей полностью собирается первая зона Френеля, затем собираются зоны определённого волнового размера (которые в дальнейшем будем называть дополнительными зонами), занимающие области на цилиндрической апертуре с центрами в границах цилиндрических зон Френеля [4], т. е. в точках

$h_n \approx \sqrt{(n-1/4)\lambda_l F}$, n>1. Выбор волнового размера этих зон будет обсуждаться ниже. Преобразователи, заполняющие первую зону Френеля, находящиеся между второй и третьей, четвёртой и пятой зонами и т. д. запитываются в фазе, остальные в противофазе. Схема заполнения апертуры антенны преобразователями показана на рис. 2, серым цветом выделены области, где активные элементы отсутствуют.

В дальнейшем при расчётах будем пользоваться модельной ситуацией, математическая формулировка которой дана в [12] (выражения (2–6)). Там же описаны стандартные методы решения задачи.

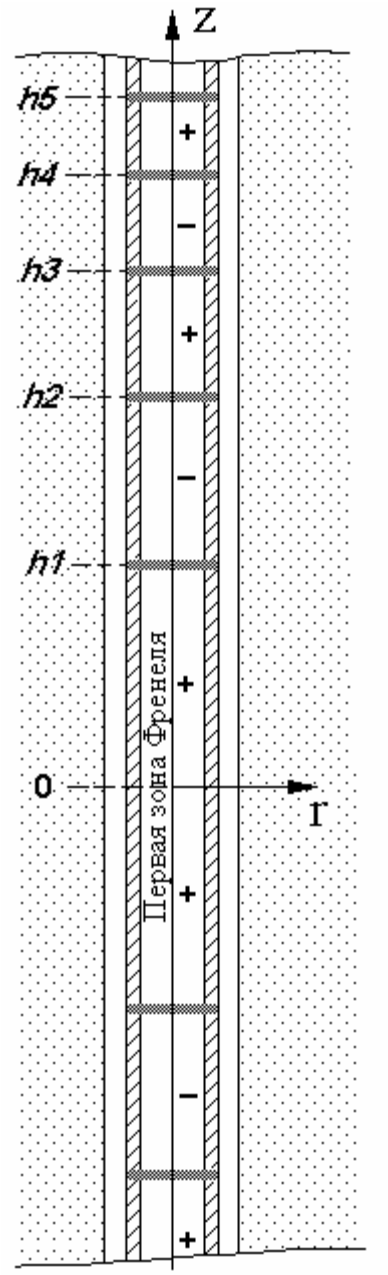

Рис. 1. Классическая цилиндрическая зонная линза

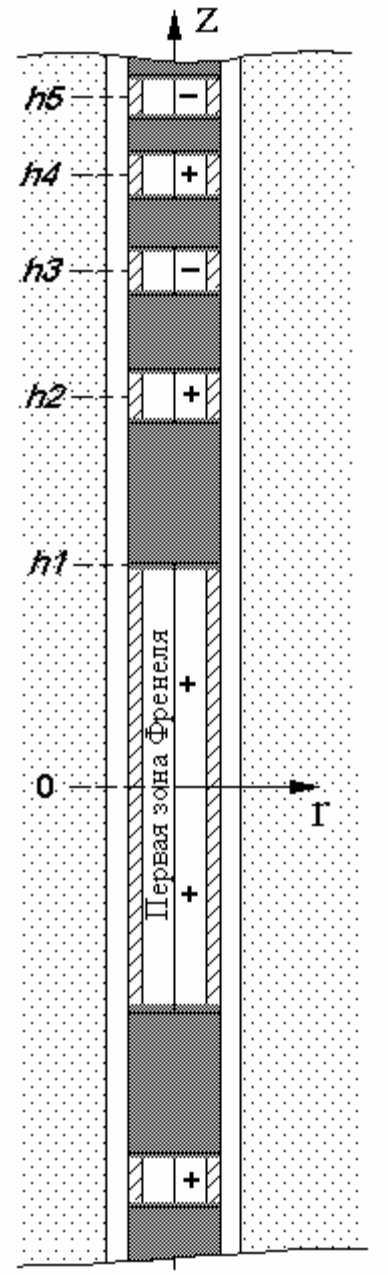

Рис. 2. Цилиндрическая зонная линза с не полностью заполненной апертурой

На рис. 3 показаны характерные распределения амплитуды радиальных смещений u_r, нормированной на модуль продольного волнового вектора k_l, в фокальной плоскости ($k_l z = 0$) в около скважинном пространстве для обоих вариантов реализации зонной линзы. Центр последней дополнительной зоны в этой антенне находится в точке h_7. Численные значения параметров для расчётов взяты из [2, 12], рассматривается случай, когда система «антенна – скважина – массив» настроена в резонанс [11, 12].

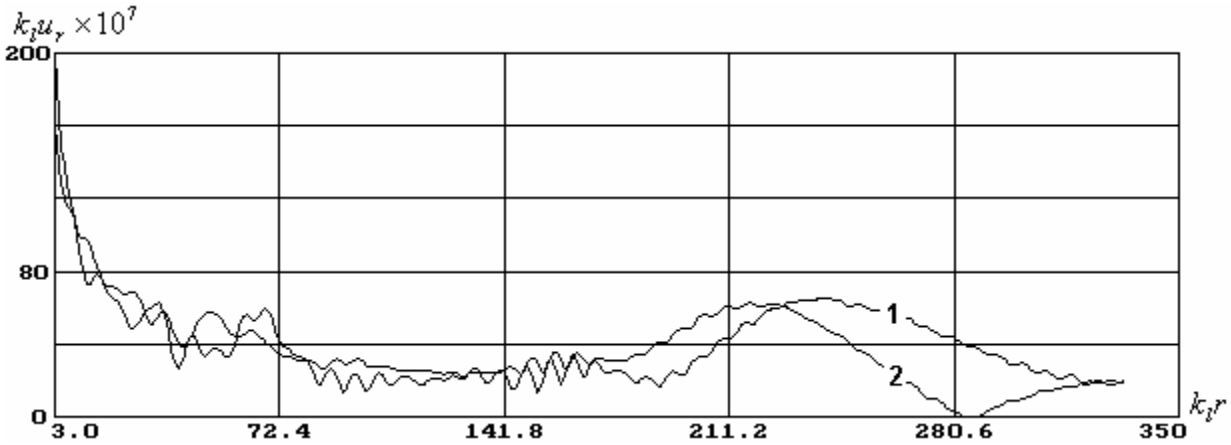

Рис. 3. Характерные распределения амплитуды радиальных смещений в фокальной плоскости $k_l z = 0$

1 — классическая зонная линза (7 зон Френеля),
2 — зонная линза с не полностью заполненной апертурой

По коэффициенту усиления зонная линза с не полностью заполненной апертурой практически не уступает классической зонной линзе, однако, при одном и том же размере первой зоны Френеля фокус у классической линзы находится несколько дальше. Различаются также структуры фокальных областей. У линзы с не полностью заполненной апертурой фокальная область контрастней, чем у классического варианта цилиндрической зонной линзы, т. е. поле за точкой фокуса спадает значительно быстрее. Данное свойство отражает тот факт, что зонная линза с не полностью заполненной апертурой излучает в окружающее пространство меньшую интегральную акустическую энергию, чем классический вариант, так как имеет меньшую излучающую апертуру. По оценкам, для изготовления зонных линз с не полностью заполненной апертурой эквивалентных по габаритам и фокусирующим свойствам антеннам из [2], понадобится на четверть меньше электроакустических преобразователей, чем было использовано при изготовлении скважинных зонных линз для экспериментов, описанных в [2]. Свойство контрастности фокуса может быть полезным при развитии нелинейных методов исследования около скважинного пространства [3]. Кроме того, это даёт дополнительные возможности при разработке методов акустической интенсификации геотехнологических процессов, особенно в плане создания методов диагностики интенсифицируемых процессов [2].

О РАЗМЕРЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗОН

Амплитуда поля в фокусе линзы с не полностью заполненной апертурой существенно зависит от размеров дополнительных зон. Кроме того, оказывается, что для наилучшей фокусировки волновые размеры дополнительных зон должны уменьшаться с их номером. Численный эксперимент показывает, что размеры дополнительных зон Δ_m должны уменьшаться с их номером, примерно, как $\sqrt{m}$, где m=1 соответствует первой дополнительной зоне, находящейся в области с центром в точке h_2, т. е. между второй и третьей цилиндрическими зонами Френеля. Размер первой дополнительной зоны Δ_1 также определялся в численном эксперименте, результаты представлены на рис. 4.

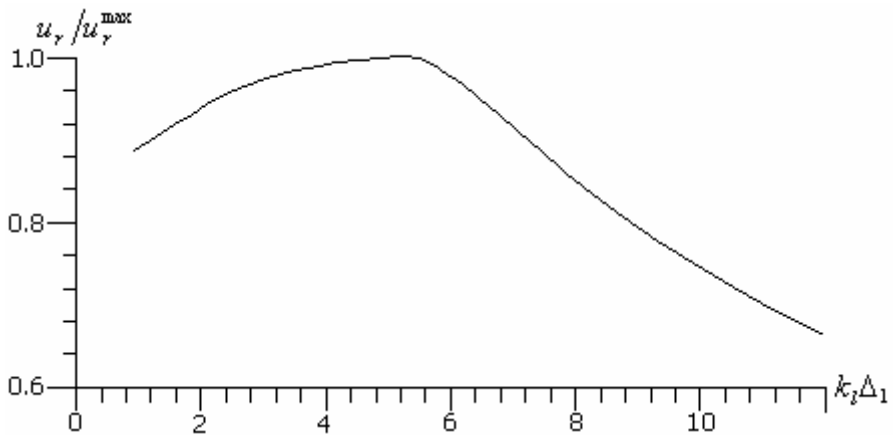

Рис. 4. Относительная амплитуда радиальных смещений в фокусе в зависимости от волнового размера первой дополнительной зоны

Размер дополнительной зоны Δ_1, таким образом, должен быть меньше чем длина продольной волны в массиве, оптимальное значение $\Delta_1 \sim 0.8\lambda_l$. Кроме того, необходимо выполнение условия $F>>\lambda$. В ходе численных экспериментов исследовались различные варианты с нецентральным расположением дополнительных зон относительно точек h_n, однако максимальное значение коэффициента усиления зонной линзы с не полностью заполненной апертурой наблюдалось при условии, что преобразователи находятся в областях с центрами именно в точках h_n. Под коэффициентом усиления в данном случае понимается отношение амплитуды радиального смещения в фокусе к смещению на начальной апертуре антенны, занятой преобразователями (считается, что все преобразователи идентичны и слабо взаимодействуют друг с другом по конструкции) при условии согласования этих преобразователей с массивом через жидкую среду [11, 12].

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБСАЖЕННОЙ СКВАЖИНЕ

Численные эксперименты, результаты которых приведены выше, проводились для случая необсаженной скважины. Анализ различных ситуаций, возникающих при излучении сфокусированных фронтов из скважины при наличии обсадной трубы и цементного кольца, не входит в цели данной работы. Отметим лишь одну особенность дифракционного фокусирования: поле от протяжённой фокусирующей антенны, выполненной в виде зонной линзы, падает на внутреннюю стенку скважины нормально. Обычно устройство скважины можно описать моделью, где на цилиндрических границах сохраняются нормальные смещения и напряжения, и таким образом, распределение радиальных смещений на границе массива также будет иметь фокусирующую дифракционную структуру. В качестве иллюстрации на рисунках 5 и 6 приведены нормированные распределения радиальных смещений на границе массива в случае необсаженной и обсаженной скважин. Численные параметры для антенны и массива взяты из [2, 12]. В эксперименте, описанном в [2], использовалась антенна, состоящая из 7 зон Френеля (длина антенны ~ 5 м., диаметр 80 мм), с рабочей частотой 13.8 кГц. Продольная скорость звука в массиве была ~ 1900 м/с, поперечная ~ 980 м/с, плотность 2.3 г/см^3. Для расчётов, кроме того, взята стандартная стальная обсадная труба $\varnothing 114\times 5.2$ ($c_l^{st} = 5350$ м/с, $c_t^{st} = 2900$ м/с, ρ = 8000 кг/м^3) и цементное кольцо толщиной 15 мм ($c_l^{cem} = 3000$ м/с, $c_t^{cem} = 1800$ м/с, $\rho = 3000$ кг/м^3).

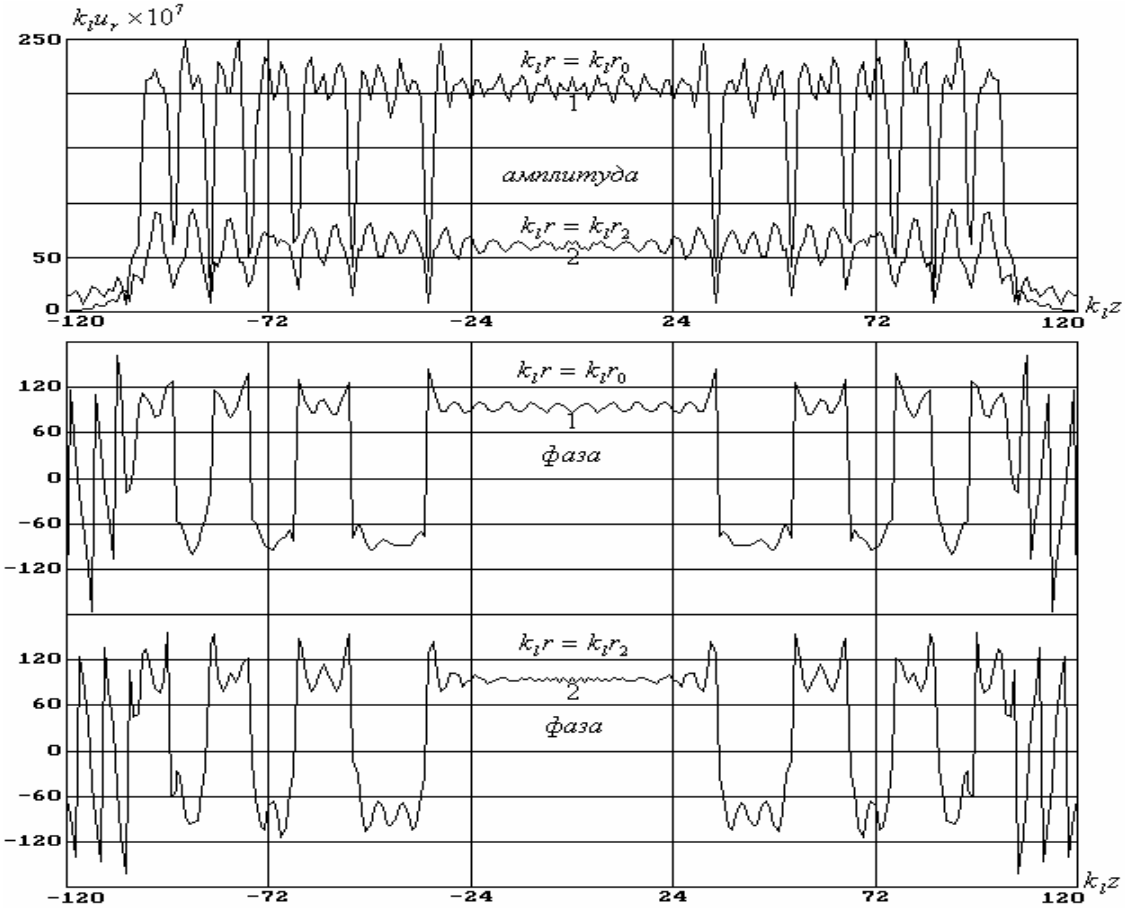

Рис. 5. Нормированные распределения радиальных смещений на границе массива в случае обсаженной (1) и необсаженной (2) скважин. Классический вариант цилиндрической зонной линзы

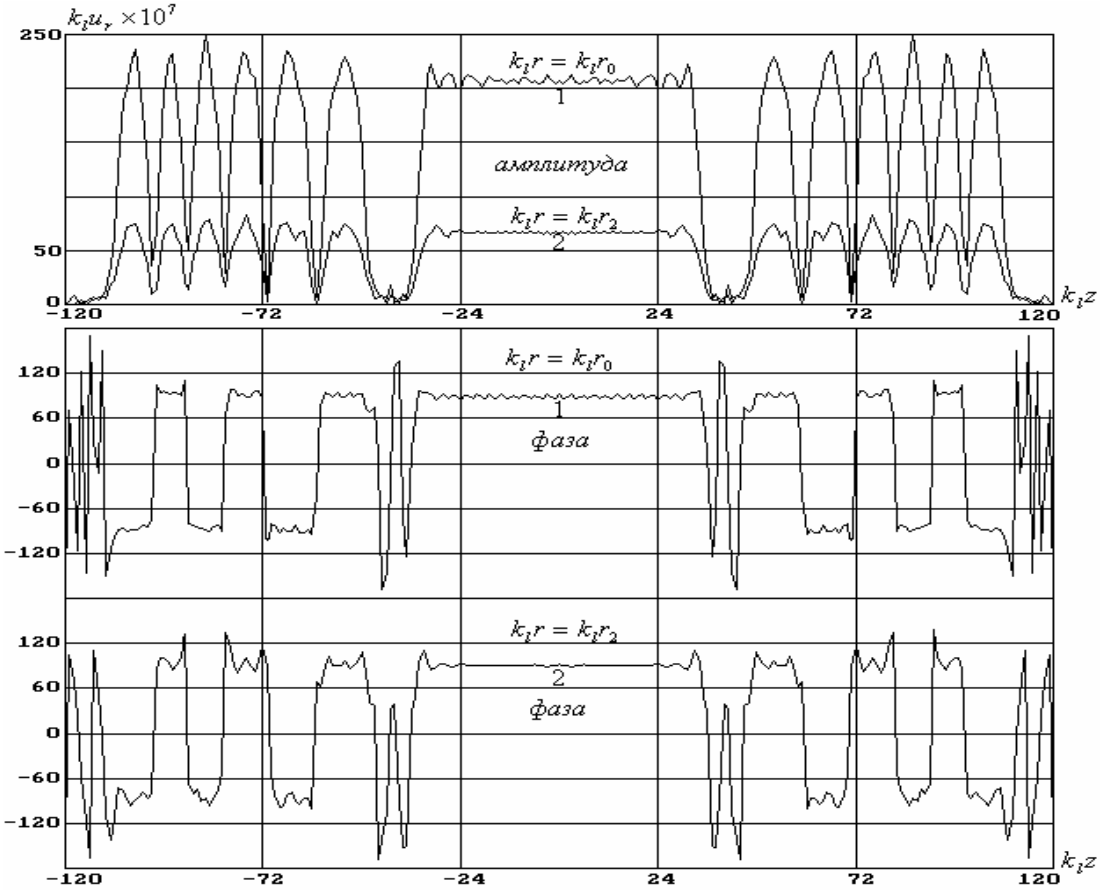

Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для линзы с незаполненной апертурой

При расчёте случая с необсаженной скважиной внутренний диаметр скважины считался равным внутреннему диаметру обсадной трубы. Таким образом, задача характеризуется следующими геометрическими параметрами: внутренний радиус обсадной трубы (необсаженной скважины) r_0 = 51.8 мм, внешний радиус обсадной трубы r_1 = 57 мм и внешний радиус цементного кольца (граница массива) r_2 = 72 мм. В качестве модельных граничных условий взяты условия жёсткого контакта обсадной трубы с цементным кольцом и цементного кольца с породой (см., например, [14]). На рис. 5 представлена классическая зонная линза: 1 — случай необсаженной скважины, 2 — случай с зацементированной обсадной трубой. На рис. 6 всё то же самое, но для зонной линзы с не полностью заполненной апертурой. Случай 1 на рис. 5 соответствует случаю 1 на рис. 3, а случай 1 на рис. 6 соответствует случаю 2 на рис. 3.

Зацементированная обсадная труба в рассмотренном модельном случае заметно уменьшает амплитуду поля в массиве, однако, фокусирующее распределение поля сохраняется. Наличие границы «жидкость – твёрдая среда» больше влияет на распределение фаз радиальных смещений в случае зонной линзы с не полностью заполненной апертурой: появляются области с инвертированной фазой, что ухудшает фокусировку, сглаживается переход между областями с противоположной фазой. По всей видимости, именно эти особенности приводят к тому, что фокусы у классической зонной линзы и линзы с не полностью заполненной апертурой не совпадают. В безграничной же среде эти фокусы совпадают [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены два способа формирования фокусирующей зонной структуры на цилиндрической апертуре. Основное приложение исследуемых цилиндрических зонных линз — это скважинная акустика, особенно, в части воздействия полями упругих колебаний на геотехнологические процессы. Скважинные фокусирующие антенны, собранные как зонные линзы, оказываются достаточно простыми по конструкции, используется лишь противофазное включение различных зон. При этом появляются предпосылки для создания совершенно новых технологий акустического воздействия на скважинные геотехнологические процессы, так как появляются, во-первых, возможность резкого увеличения амплитуд упругих полей в прискважинной зоне, связанного с компенсацией цилиндрической расходимости и, во-вторых, возможность управления положением фокуса с помощью частотной перестройки преобразователей, из которых фокусирующая скважинная антенна сделана. Устройство продуктивных коллекторов в современных скважинных геотехнологиях может быть достаточно сложным. При инженерно-технических расчётах необходимо учитывать множество характерных для каждого конкретного случая факторов, таких как вид обсадки в зоне коллектора и устройство затрубного пространства, характеристики фильтров или перфорации, особенности затухания упругих волн в прискважинной зоне и т. д. Большинство факторов можно учесть, пользуясь современными средствами конечно-элементного анализа и проектирования.

Результаты данной работы, описывающие общую идею и варианты создания простых и эффективных фокусирующих антенн, могут служить основой для инженерных расчётов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 03-02-16805, 03-02-17074 и гранта Минобразования E02-8.0-58.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings on the First Conference on Elastic-Wave Stimulation of Fluid Flow in Porous Media, Gubkin Oil and Gas University, Moscow, 2002.
2. Касьянов Д. А., Шалашов Г. М. Об опыте акустического воздействия на процесс подземного выщелачивания редких металлов. Труды XI Сессии РАО. Т. 2. М.: ГЕОС, 2001.С. 121–125.
3. Касьянов Д. А., Шалашов Г. М. Фокусирование расходящихся цилиндрических волн и перспективы скважинной акустики. Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. №2. С. 170–186.
4. Касьянов Д. А. Цилиндрическая зонная линза. Изв. вузов. Радиофизика. 2000. № 9. С. 782–792
5. Касьянов Д. А. Фокусирование расходящейся цилиндрической волны. Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 6. С. 1078–1087.
6. Касьянов Д. А. Фокусирование расходящейся цилиндрической волны II. Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 78–83.

7. Каневский И. Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М.: Наука. 1977. 366 с.
8. Горелик Г. С. Колебания и волны. М.: Физматгиз. 1959. 572 с.
9. Малюжинец Г. Д. Дифракция вблизи оси зональной пластинки. ДАН СССР. 1946. Т. 54. № 5. С. 403–406.
10. Карпачева А. А., Розенберг Л. Д., Тартаковский Б. Д. Экспериментальное исследование дифракции в фокусе зональной пластинки. ДАН СССР. 1946. Т. 54. №5. С. 399–401.
11. Касьянов Д. А. О работе протяжённой пьезокерамической антенны в скважине. Изв. Вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. №2. С. 111–122.
12. Касьянов Д. А. Об особенностях работы некомпенсированной пьезокерамической антенны в скважине. Техническая акустика. 2003. 3. http://webcenter.ru/~eeaa/ejta/
13. Касьянов Д. А. О работе фокусирующей пьезокерамической антенны в скважине. Сборник трудов XIII Сессии Российского Акустического общества, т. 2. М: ГЕОС, 2003. С. 95–98.
14. Крауклис П. В., Крауклис Л. А. О спектре продольной волны в скважине с зацементированной обсадной колонной. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. 17. Л.: Наука. 1976. С. 156–164.