

Gritsov Vladimir Vladislavovich
Southern Federal University,
Institute of Radio Engineering Systems and Control,
cand. of eng. sc., associate professor. (Taganrog, Russia)

**ANALYSIS OF PHASE CHARACTERISTICS OF SOUND WAVE
SPHERICALLY CONVERGING AND GENERATED
BY PARAMETRIC ANTENNA**

Annotation. As part of this work, experimental studies were carried out aimed at understanding the processes of nonlinear interaction of acoustic waves. The object of the study was a parametric antenna, which used a weakly bent converter to generate pump waves. Both the amplitude and phase characteristics of the sound field generated by focusing pump transducers, which play an important role in the operation of parametric antennas, have been studied. Of particular interest is the phenomenon that occurs in focus: here the pumping waves that initially propagate to the center (spherically converging) change their direction to the opposite (spherically diverging). This transition is accompanied by a 180-degree change in the oscillation phase. Analysis of the obtained data describing the phase and amplitude properties of such sonar emitters showed that in the region distant from the source (far zone), the spatial characteristics of the interaction of ultrasonic waves are like those observed in antennas using a convex pump converter. The key conclusion of the experimental studies was the establishment that parametric radiating antennas form an acoustic field with a uniform phase structure in the entire region where the interaction of pumping waves occurs. The basic principles that determine the formation of such a field were also identified.

Due to their advantages, such as stable phase characteristics, wide bandwidth, lack of side lobes and compact dimensions, parametric antennas with focusing pump converters can be successfully used in measuring parametric emitters for hydroacoustic measurements.

Гривцов Владимир Владиславович
Южный федеральный университет,
Институт радиотехнических систем и управления,
доцент, кандидат технических наук
(Таганрог, Россия)

**АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ,
СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩЕЙСЯ И ГЕНЕРИРУЕМОЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ**

Аннотация. В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования, направленные на понимание процессов нелинейного взаимодействия акустических волн. В качестве объекта исследования выступала параметрическая антенна, в которой использовался слабоогнутый преобразователь для генерации волн накачки. Были изучены как

амплитудные, так и фазовые характеристики звукового поля, создаваемого фокусирующими преобразователями накачки, которые играют важную роль в работе параметрических антенн. Особый интерес представляет явление, происходящее в фокусе: здесь волны накачки, изначально распространяющиеся к центру (сферически сходящиеся), меняют свое направление на противоположное (сферически расходящиеся). Этот переход сопровождается изменением фазы колебаний на 180 градусов. Анализ полученных данных, описывающих фазовые и амплитудные свойства таких гидроакустических излучателей, показал, что в области, удаленной от источника (дальняя зона), пространственные характеристики взаимодействия ультразвуковых волн оказываются схожими с теми, что наблюдаются у антенн, использующих выпуклый преобразователь накачки. Ключевым выводом проведенных экспериментальных исследований стало установление того, что параметрические излучающие антенны формируют акустическое поле с равномерной фазовой структурой во всей области, где происходит взаимодействие накачивающих волн. Были также выявлены основные принципы, определяющие формирование такого поля. Благодаря своим преимуществам, таким как стабильные фазовые характеристики, широкая полоса пропускания, отсутствие боковых лепестков диаграммы направленности и компактные размеры, параметрические антенны с фокусирующими преобразователями накачки могут быть успешно применены в измерительных параметрических излучателях для проведения гидроакустических измерений.

Введение. Распределенная в пространстве акустическая антенна, где активным элементом является участок водной среды, обладает уникальными свойствами. Основные достоинства параметрических антенн - широкополосность, практическое отсутствие бокового излучения, малогабаритность с максимальной эффективностью реализуются в измерительных приборах и комплексах, где даже низкий коэффициент преобразования энергии не является препятствием к их освоению [5].

Эксплуатационные параметры и метрологические характеристики нелинейных акустических излучателей в значительной мере определяются фазовыми соотношениями в параметрической антенне. Поэтому при разработке и использовании параметрических измерительных излучателей возникает необходимость в изучении типа волны и реальной формы волнового фронта распространяющегося разностного сигнала на различных расстояниях от излучателя. Ответ на эти вопросы могут дать фазовые характеристики, которые несут информацию о зонах формирования вторичного излучения и физических процессах в параметрической антенне.

Особенности пространственного распределения фазы и амплитуды звукового давления волны разностной частоты (ВРЧ) дают определенные преимущества при проведении гидроакустических измерений с помощью параметрических антенн [3].

Ниже рассмотрены амплитудные и фазовые распределения звукового давления разностного сигнала, генерируемого преобразователем накачки со

сходящимся волновым фронтом.

Постановка задачи. В качестве объекта измерений использовался слабоогнутый излучатель [2,5], представляющий собой пьезокерамический шаровой сегмент (рис. 1) с осью симметрии вдоль оси z и радиусом кривизны R_0 , усеченный окружностью диаметром $2a$ и имеющий глубину h .

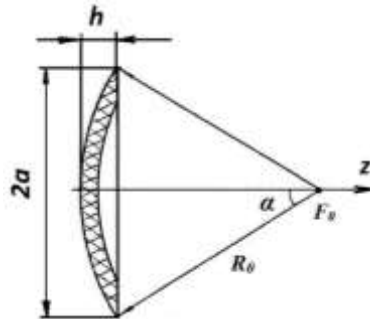


Рисунок 1. Геометрические параметры фокусирующего преобразователя

Криволинейные (выпуклые и вогнутые) преобразователи накачки нередко имеют технологические несовершенства, связанные с неоднородностью материала активного элемента, неточностью изготовления криволинейной поверхности излучателя и др., что вызывает искажения амплитудного и фазового распределения ВРЧ. Данный эффект наглядно проявляется на записях характеристик направленности параметрической антенны, представленных на рисунке 2. Рисунок иллюстрирует для сравнения диаграммы направленности на разностной частоте 75 кГц одного и того же преобразователя накачки с собственной резонансной частотой 1,03 МГц, радиусом кривизны $R_0 = 66$ мм и диаметром $2a = 35$ мм. В первом случае (рис. 2а) активный элемент излучал расходящуюся сферическую волну накачки, во втором (рис. 2б) он использовался как фокусирующий излучатель с фокусным расстоянием $F_0 = 66$ мм. Уровень подводимой мощности в обоих случаях поддерживался постоянным.

Характеристика направленности слабовыпуклого преобразователя накачки (а) из-за несовершенства изготовления активного элемента имеет изрезанный вид, провалы в ней могут достигать 20–30 дБ.

В результате при создании, например, параметрических измерительных излучателей звука случается заменять выпуклую поверхность преобразователей накачки вогнутой, т. е. для получения широкой диаграммы направленности на частоте разностного сигнала (порядка 25–30°) приходится применять фокусировку звуковых волн накачки.

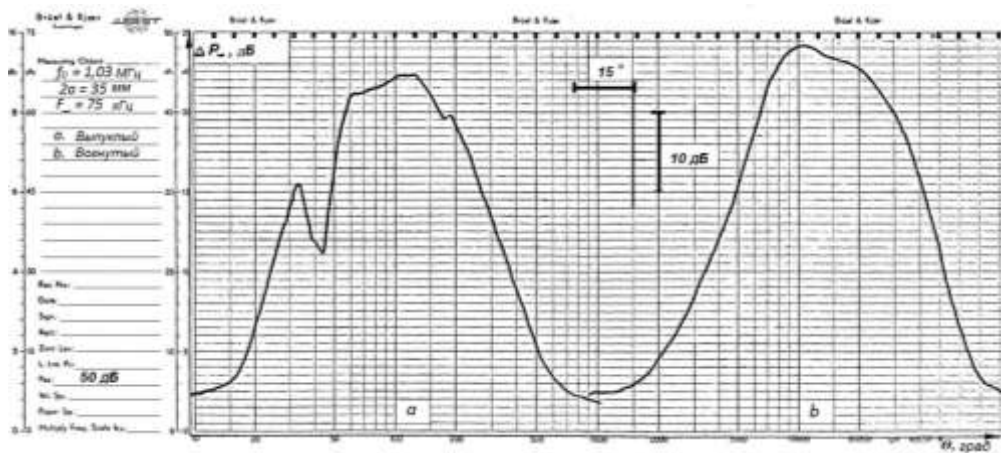


Рисунок 2. Диаграммы направленности параметрической антенны со слабовыпуклым (а) и слабовогнутым (b) преобразователями накачки.

Рассмотрим фазовые и амплитудные распределения ВРЧ в случае использования фокусирующих преобразователей накачки. Данный тип преобразователей накачки параметрических антенн вызывает определенный интерес наличием фокуса и трансформацией фронта волн накачки в фокальной плоскости [1].

Описание эксперимента. Согласно линейной теории фокусирующих излучателей, фронт волны накачки на преобразователе является вогнутым, а волна до фокуса - сферически сходящейся. После фокальной плоскости, при $z > F_0$, где F_0 - фокусное расстояние, фронт волны становится выпуклым, т. е. волна сферически расходящаяся. При этом фаза колебаний, как известно, изменяется на величину π [6].

Рассмотрим некоторые особенности формирования волны разностной частоты слабовогнутым преобразователем накачки (рис. 1).

Для экспериментальных исследований использовался излучатель с собственной резонансной частотой 1,37 МГц, диаметром, $2a = 47$ мм и радиусом кривизны, и фокусом $R_0 = F_0 = 47$ мм.

Амплитуда звукового давления волны разностного сигнала на оси преобразователя накачки для различных частот представлена на рисунке 3. Возникающая за счет нелинейных эффектов в среде, волна разностной частоты в области перед фокусом является сходящейся, как и взаимодействующие волны накачки. Энергия этой звуковой волны концентрируется в фокальной плоскости, что отмечено значительным максимумом звукового давления на расстоянии, равном фокусному. Поперечное распределение звукового давления в окрестности фокуса, представленное на рисунке 4, иллюстрирует отсутствие осцилляций в фокальной плоскости параметрической антенны, которые имеют место в "линейном" фокусирующем излучателе. Диаметр зрачка D -области, в которой фокусируется разностная звуковая волна, на уровне - 3 дБ составляет 1,5 мм, что соответствует теоретически рассчитанному размеру фокального пятна для волн накачки [6]. При дальнейшем распространении сигнала ВРЧ после фокуса энергия его на оси быстро убывает, быстрее, чем для излучателя

со слаборасходящимся волновым фронтом.

Для сравнения на рисунке 3 представлено осевое амплитудное распределение звукового давления разностной частоты 20 кГц выпуклого излучателя накачки с параметрами, идентичными вогнутому преобразователю. При этом амплитуда возбуждения активного элемента в обоих случаях поддерживалась одной и той же величины $P_{01} = P_{02} = 85$ дБ, где P_{01}, P_{02} - начальные уровни амплитуды давления волн накачки.

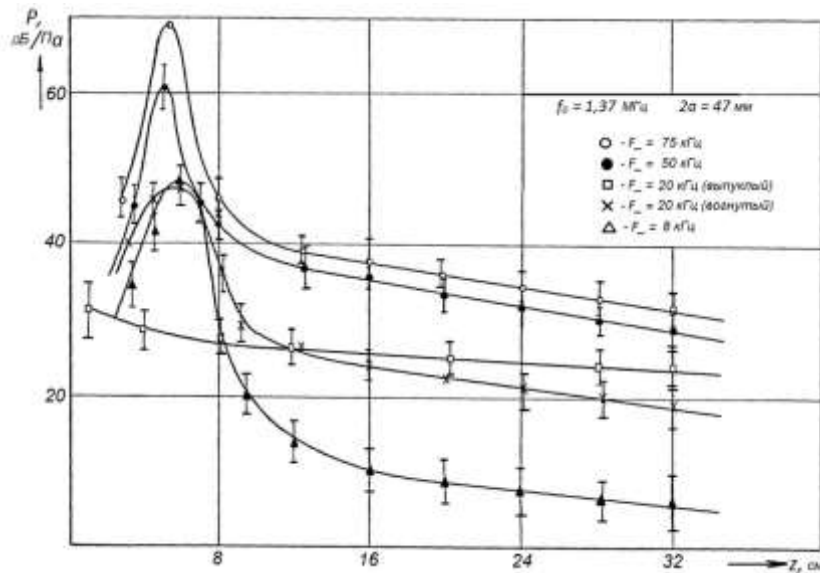


Рисунок 3. Изменение амплитуды звукового давления в параметрической антенне на оси фокусирующего преобразователя накачки

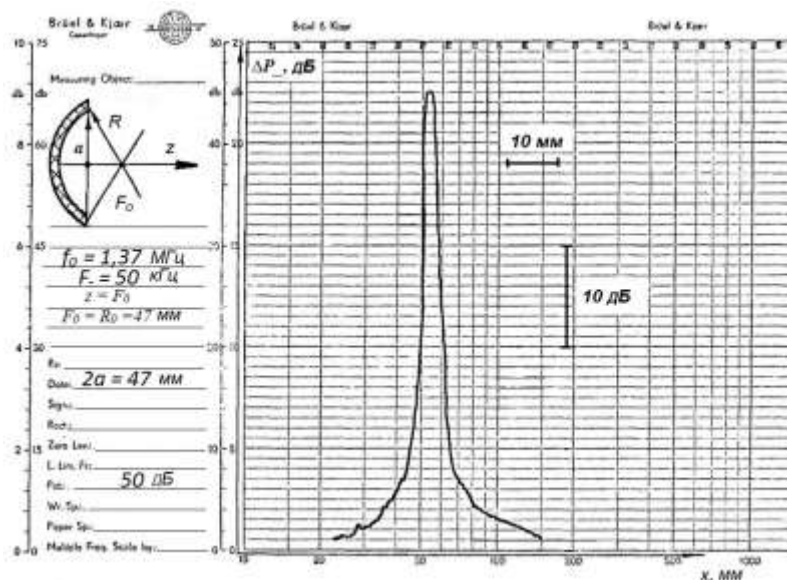


Рисунок 4. Поперечное распределение амплитуды звукового давления разностного сигнала в области фокуса.

Амплитуда звукового давления ВРЧ, согласно теоретическим и экспериментальным результатам [5], пропорциональна произведению амплитуд

звукового давления волн накачки. Процесс этот носит линейный характер до определенной величины интенсивности исходных волн на поверхности излучателя, выше которой наступает явление "насыщения". Эффект "насыщения" проявляется в том, что заметная часть энергии взаимодействующих волн идет на генерацию новых спектральных составляющих, в частности, вторую гармонику разностной частоты.

С помощью несложной формулы возможна теоретическая оценка предельных уровней звукового давления волн накачки [5], при которых наступает «насыщение»:

$$P_{st}^n = \frac{0,69\rho_0 c_0^3}{\varepsilon\omega},$$

где P_{st}^n – амплитуда звукового давления волн накачки ударного порога, приведенная к 1 м.;

ρ – плотность воды;

c – скорость распространения акустических волн в воде;

ε – параметр нелинейности воды;

ω – частота волн накачки.

Для вогнутых преобразователей накачки параметрических излучателей, использующих эффект фокусировки звука, явлению "насыщения" следует уделять внимание, поскольку в относительно небольшом объеме концентрируется значительная энергия волн накачки и возникает нелинейное поглощение звука.

Амплитудные характеристики процесса генерации разностной частоты 50 кГц и ее второй гармоники 100 кГц приведены на рис. 5.

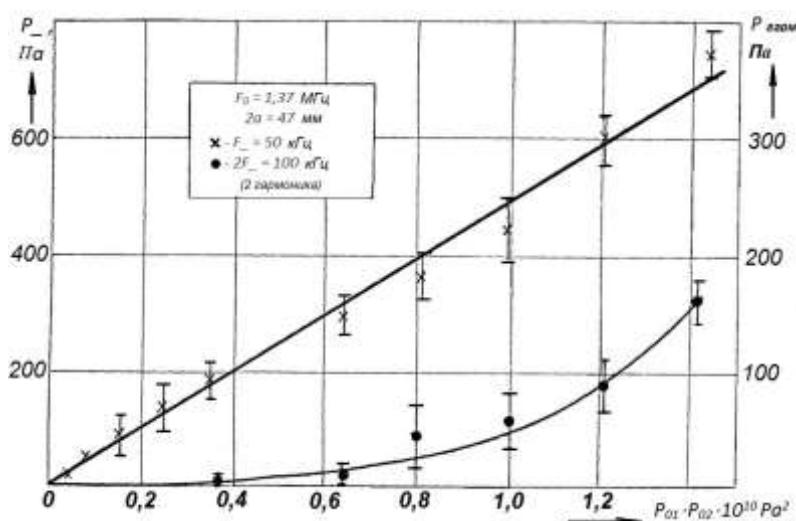


Рисунок 5. Амплитудные характеристики параметрической антенны со слабовогнутым преобразователем накачки.

Как и следовало ожидать, амплитудная характеристика параметрического излучателя на основной гармонике разностного сигнала линейна в широком диапазоне амплитуд исходных волн. Значительный рост амплитуды звукового давления второй гармоники означает, достижение нелинейным излучателем

эффекта "насыщения".

В этом случае происходит "рассасывание" энергии волн накачки на дополнительную генерацию спектральных составляющих.

Необходимо подчеркнуть, что для слабовогнутых преобразователей накачки следует учитывать явление "насыщения", в отличие от слабовыпуклых, у которых за счет сферической расходимости волн этот эффект практически не наступает.

В области взаимодействия, расположенной до фокуса, происходит концентрация источников волны разностной частоты, поскольку фронт взаимодействующих волн накачки является сходящимся. Область фокуса можно представить, как мнимый излучатель волн накачки с фазами отличными от фаз волн до фокуса на величину π . *Мнимый источник формирует новую волну разностной частоты. Поэтому в районе фокуса происходит фазовый сдвиг. В дальнейшем распределение фазы происходит аналогично распределению фазы в параметрической антенне с плоским излучателем накачки.*

Подтверждают сказанное экспериментальные данные рисунка 6 с записью распределений полной фазы ($\varphi = kz + \Delta\varphi$) звукового давления разностного сигнала с частотами 50 и 100 кГц вдоль оси вогнутого преобразователя накачки. Записи получены для области взаимодействия до и после фокуса. Пределы измерения используемого фазометра составляют $0 \pm 180^\circ$, и существующая нелинейность прибора в области разности фаз $\pm 180^\circ$ преобразует линейное изменение фазы в синусоиду. Поэтому на представленных записях необходимо рассматривать только положительные полуволны.

На рисунке 6 расстояние между вершинами полуволн равно длине волны разностного сигнала λ . В окрестности фокуса ($z \approx F_0$) длина волны заметно изменяется (λ^1) по сравнению с длиной волны установившегося процесса λ . В этой зоне происходит *фазовый сдвиг волн разностной частоты, образованными до и после фокуса*. Изменение длины волны в окрестности фокуса при фокусировании звуковых и ультразвуковых волн описано в работе [4].

Для определения фазовой структуры звукового поля ВРЧ слабовогнутого излучателя накачки проведена серия измерений амплитудных и фазовых характеристик. Нормированным расстоянием вдоль акустической оси принято фокусное расстояние F_0 .

Дополняют картину формирования фронта волны разностного сигнала поперечные фазовые распределения звукового давления в различных зонах формирования ВРЧ слабовогнутого преобразователя накачки, представленные на рисунках 8 и 9 [2]. Одновременно на этих рисунках соответствующие записи иллюстрируют изменение амплитуд звукового давления в исследуемом сечении параметрической антенны.

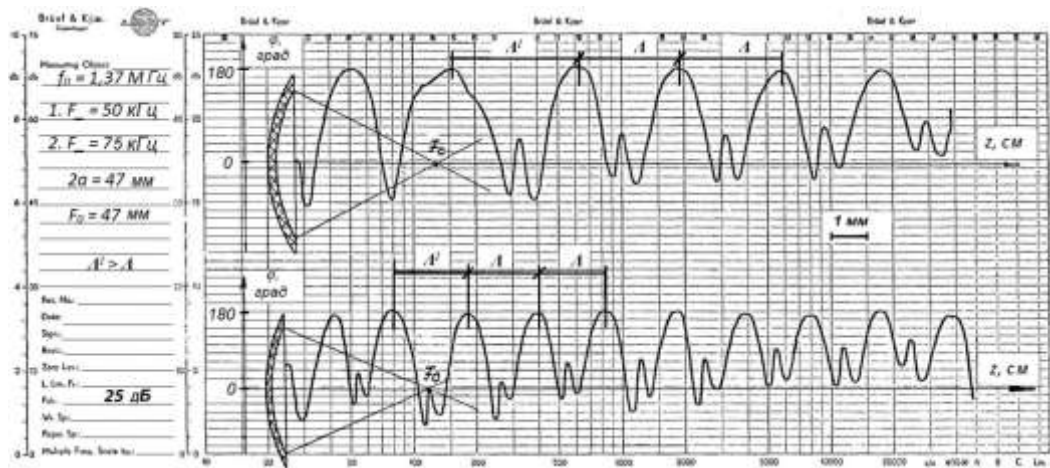


Рисунок 6. Распределение фазы разностного сигнала на оси параметрической антенны с фокусирующим преобразователем накачки.

На расстоянии $z < F_0$ поведение амплитудных и фазовых характеристик исследуемой параметрической антенны близко к поведению аналогичных характеристик для плоского преобразователя накачки в ближней зоне излучателя [5]. Это объясняется образованием до фокуса узкого звукового пучка, близкого по своему характеру к плоскому излучателю за счет того, что угол раскрытия фокусирующего преобразователя $\alpha < 30^\circ$ невелик (по результатам измерений характеристик направленности).

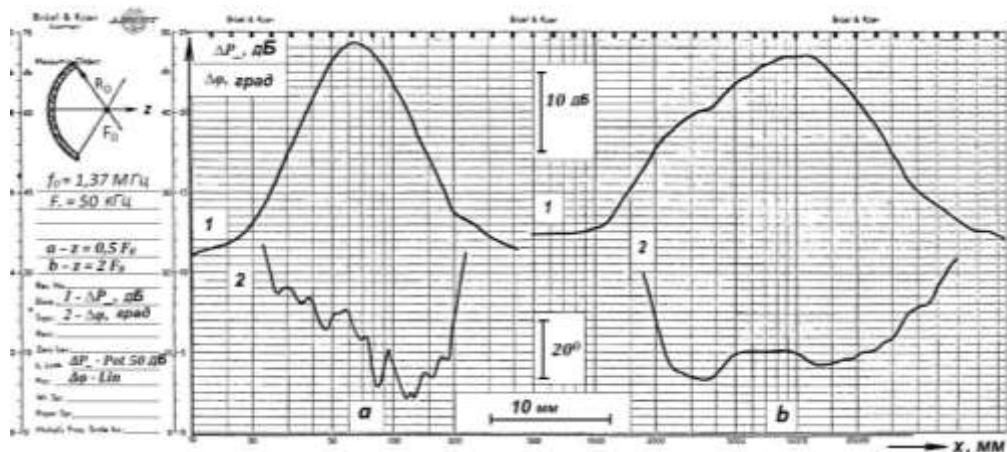


Рисунок 7. Поперечные амплитудные (1) и фазовые (2) распределения звукового давления параметрической антенны с фокусирующим преобразователем накачки ($z = 0,5F_0$, $z = 2F_0$).

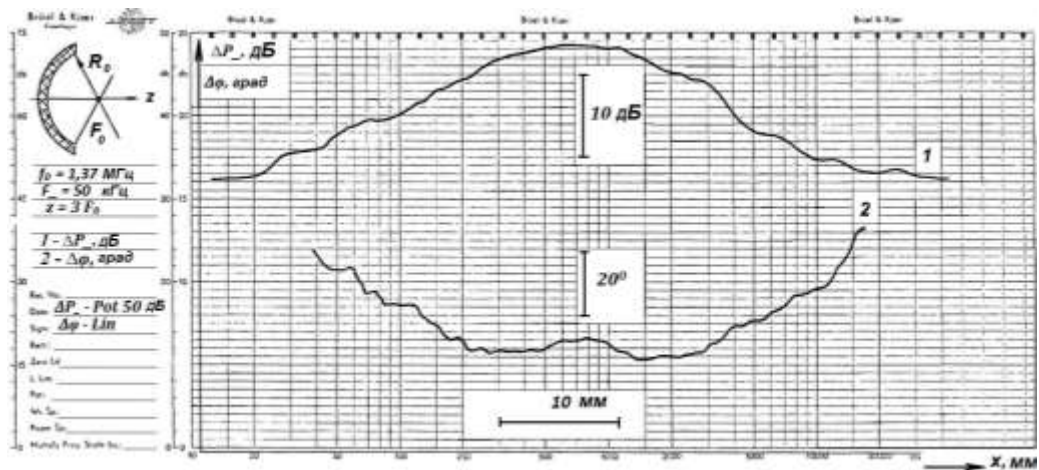


Рисунок 8. Поперечные амплитудные (1) и фазовые (2) распределения звукового давления параметрической антенны с фокусирующим преобразователем накачки ($z = 3F_0$).

На расстояниях от поверхности активного элемента, превышающих фокусное $z > F_0$, распределение амплитуды и фазы звукового давления ВРЧ мало чем отличается от соответствующих распределений слабовыпуклого излучателя накачки [2]. В этой области распространяется сферически расходящаяся волна с центром кривизны, расположенным в фокусе.

Заключение. Экспериментальный анализ фазовой структуры звукового поля параметрической антенны, оснащенной фокусирующим излучателем, показал, что в дальней зоне её пространственные характеристики волн разностной частоты (ВРЧ) схожи с таковыми у антенн, использующих выпуклый преобразователь накачки. Однако, фокусирующий преобразователь накачки имеет свои уникальные особенности в формировании вторичного излучения: в области фокуса происходит значительная трансформация фазового фронта как для волн накачки, так и для ВРЧ. Это приводит к увеличению дистанции, необходимой для полного формирования сферически расходящейся волны. Следовательно, при проведении гидроакустических измерений с использованием параметрических антенн с фокусирующими излучателями, необходимо учитывать это обстоятельство.

Список использованных источников:

1. Гаврилов А. М., Ситников Р.О., Грачева Г. М. Многозначность структуры дальнего поля сферически сходящегося волнового пучка [Известия ЮФУ. Технические науки](#). 2009. № 6 (95). С. 65–71.
2. Гривцов В.В. Исследование фазовых характеристик параметрических антенн и создание параметрических излучателей с равномерным фазовым распределением. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук Л. ЛЭТИ., 1983, с.205.
3. Гривцов В.В., Рыбачек М.С. Фазовые характеристики измерительных параметрических излучателей звука; - Труды V научно-технической

конференции по информационной акустике М., 1980; с.85-90.

4. Каневский И.Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М., Наука, 1977, с. 336.

5. Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в гидролокации. Ленинград: Судостроение, 1990. с.256.

6. Розенберг Л. Ф. Фокусирующие излучатели ультразвука - В кн. Источники мощного ультразвука, ч. III, Наука, М., 1967, с.151-206.