

Исследование нелинейного взаимодействия сдвиговых акустических волн в донных осадках, возбуждаемых параметрической излучающей антенной на границе раздела

Ю.В. Душенин

Южный федеральный университет

Аннотация: Эффективное применение параметрических излучающих антенн для обнаружения объектов, находящихся в донных осадках, обусловлено их возможностью формировать высоконаправленное излучение на низких частотах при малых исходных габаритах. В отличие от воды, донные осадки (ДО) представляют собой среды, в которых присутствуют как продольная, так и сдвиговая составляющие скорости распространения акустических колебаний. Наличие нескольких компонент скорости в донных осадках дает возможность возбуждения различного типа волн при использовании параметрических излучающих антенн.

В данной работе представлены теоретические и экспериментальные исследования поля создаваемого параметрической излучающей антенной в многофазной среде «вода – донные осадки» при наклонном падении на границу раздела под углами, близкими к критическим.

Показано, что сформированные в воде продольные волны накачки и волны разностной частоты (ВРЧ) в ДО трансформируются в соответствующие сдвиговые волны. Кроме того, из-за возникновения на границе раздела мнимой параметрической антенны (ПА) происходит генерация сдвиговых ВРЧ в ДО.

Исследования возбуждения сдвиговых ВРЧ в ДО были проведены в лабораторном гидроакустическом бассейне. В качестве моделей ДО использовались глина и песок. По временному признаку выделены сдвиговые ВРЧ в различного типа осадках. Из полученной теоретической модели рассчитаны, а затем экспериментально подтверждены основные характеристики поля ПА в ДО при возбуждении в них сдвиговых ВРЧ. По результатам теоретических и экспериментальных исследований доказано, что имеет место трансформация, возбуждение и генерация сдвиговых волн, формируемых ПА в ДО. Полученные в ходе исследования результаты дают хорошее совпадение между теорией и практикой, что говорит о правильности выбора модели.

Кроме того, приведены экспериментальные результаты по использованию сдвиговых ВРЧ в ДО при эхолокационном режиме.

Таким образом, данный метод можно использовать в параметрических гидролокаторах для стратификации ДО и обнаружения в них различных инородных целей.

Ключевые слова: параметрическая антенна, нелинейное взаимодействие, донные осадки, сдвиговая волна разностной частоты, критический угол.

Для зондирования дна Мирового океана с последующим проникновением акустических волн в ДО, в последнее время широко используются параметрические гидролокаторы. Большая эффективность их применения для решения задач стратификации ДО и обнаружения заиленных

объектов обусловлена способностью формировать высоконаправленное излучение на низких частотах при малых габаритах исходной антенны накачки [1, 2]. Для приборов такого класса сама физическая среда обнаружения «вода – ДО» является «активным элементом» ПА и правомерно предположить зависимость ее характеристик от структуры ДО.

ДО по своей структуре являются сложными многофазными средами, в которых присутствуют как продольные, так и поперечные составляющие скорости распространения колебаний [3]. Наличие нескольких компонент скорости колебаний в ДО открывает возможности возбуждения различного типа волн в них при использовании ПА, что может сделать параметрические гидролокаторы еще более востребованными для исследовательских задач.

В работе [4] рассмотрен случай падения продольной волны из воды на плоскую границу раздела под углами α_0 , близкими к критическим. Геометрия задачи представлена на рисунке 1. Видно, что в ДО присутствуют две преломленные волны – продольная и сдвиговая, распространяющиеся под углами α_l и α_τ со скоростями c_l и c_τ .

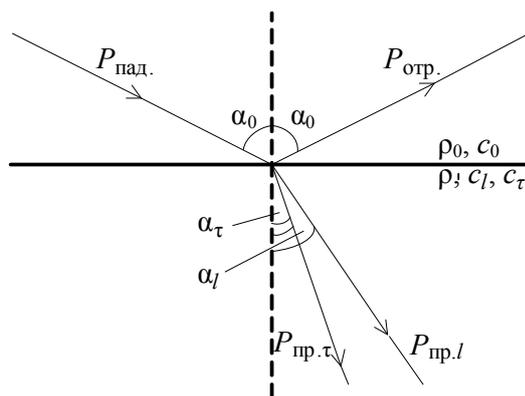


Рисунок 1 – Геометрия задачи падения продольной волны на плоскую границу раздела вода – ДО под углами, близкими к критическим

При этом энергию звукового поля можно представить в виде:

$$P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{пр.л}} + P_{\text{пр.т}} \quad (1)$$

Амплитуды отраженной и прошедшей волн для углов падения меньших углов полного внутреннего отражения определяются из соотношений:

$$P_{\text{отр}} = V \cdot P_{\text{пад}}$$

$$P_{\text{пр.}l} = W_l \cdot P_{\text{пад}}$$

$$P_{\text{пр.}\tau} = W_\tau \cdot P_{\text{пад}}$$

где V – коэффициент отражения;

W_l , W_τ – коэффициенты прохождения продольной и сдвиговой волн соответственно. Определяемые выражениями [1, 3]:

$$V = \frac{\frac{\rho'c_l}{\cos \alpha_l} \cos^2 2\alpha_\tau + \frac{\rho'c_\tau}{\cos \alpha_\tau} \sin 2\alpha_\tau - \frac{\rho_0c_0}{\cos \alpha_0}}{\frac{\rho'c_l}{\cos \alpha_l} \cos^2 2\alpha_\tau + \frac{\rho'c_\tau}{\cos \alpha_\tau} \sin 2\alpha_\tau + \frac{\rho_0c_0}{\cos \alpha_0}}$$

$$W_l = \frac{\frac{2\rho_0c_0}{\cos \alpha_0} \cos 2\alpha_\tau}{\frac{\rho'c_l}{\cos \alpha_l} \cos^2 2\alpha_\tau + \frac{\rho'c_\tau}{\cos \alpha_\tau} \sin 2\alpha_\tau + \frac{\rho_0c_0}{\cos \alpha_0}} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_l}$$

$$W_\tau = \frac{\frac{2\rho_0c_0}{\cos \alpha_0} \sin 2\alpha_\tau}{\frac{\rho'c_l}{\cos \alpha_l} \cos^2 2\alpha_\tau + \frac{\rho'c_\tau}{\cos \alpha_\tau} \sin 2\alpha_\tau + \frac{\rho_0c_0}{\cos \alpha_0}} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_\tau}$$

где α_0 – угол падения;

$$\alpha_l = \arcsin \left[\frac{c'_l}{c_0} \sin \alpha_0 \right] - \text{угол преломления продольной волны};$$

$$\alpha_\tau = \arcsin \left[\frac{c'_\tau}{c_0} \sin \alpha_0 \right] - \text{угол преломления поперечной волны}.$$

Из анализа (4) видно, что чем больше угол падения плоской волны на границу раздела, тем меньше коэффициент прохождения для продольной волны ($\alpha_\tau \rightarrow 90^\circ$, $\cos 2\alpha_\tau \rightarrow 0$), поэтому при углах, близких к углам скольжения

$W_l \rightarrow 0$. Следовательно, при критических углах падения компонентой $P_{np,l}$ в (1) можно пренебречь.

При наклонном падении под углами, близкими к критическим, на границу раздела не плоских волн, а взаимодействующих узких пучков ПА, условия формирования поля в ДО несколько изменяются, однако выражения (3 – 5) применимы и в этом случае, согласно [1].

На рисунке 2 показана схема работы высоконаправленного звукового пучка, формируемого ПА в ДО при наклонном падении.

На плоскую границу раздела под углом α_0 падает звуковой пучок, формируемый ПА. В воде, при нелинейном взаимодействии исходных волн накачки, образуются ВРЧ, которые, как и исходные, попадают на границу раздела. После чего, согласно (1), часть энергии волн звукового поля симметрично отражается, а оставшаяся часть проходит через границу раздела в ДО, где происходит их трансформация в сдвиговые волны накачки и ВРЧ. Существует два варианта формирования такого поля ПА. В первом случае граница раздела расположена в области нелинейного взаимодействия, т.е. в ближней зоне ($h \leq l_3$), где нелинейное взаимодействие волн накачки происходит до и после границы раздела. Во втором случае, при выполнении условия дальней зоны ($l_3 \ll h$), взаимодействия в ДО не происходит, и задача сводится к рассмотрению обычной линейной модели. В данной работе рассмотрен первый вариант формирования поля ПА в ДО.

Вначале рассмотрим теоретическую модель, описывающую поведение поля ПА работающей в многофазной среде «вода–ДО» при углах падения, близких к критическим.

По аналогии с [3] считается, что ДО по своей структуре близки к жидким средам распространения, таким как вода. Поэтому, для описания поля ПА в этих средах можно использовать уравнение Хохлова-Заболотской-Кузнецова, традиционно применяемое в нелинейной гидроакустике [1].

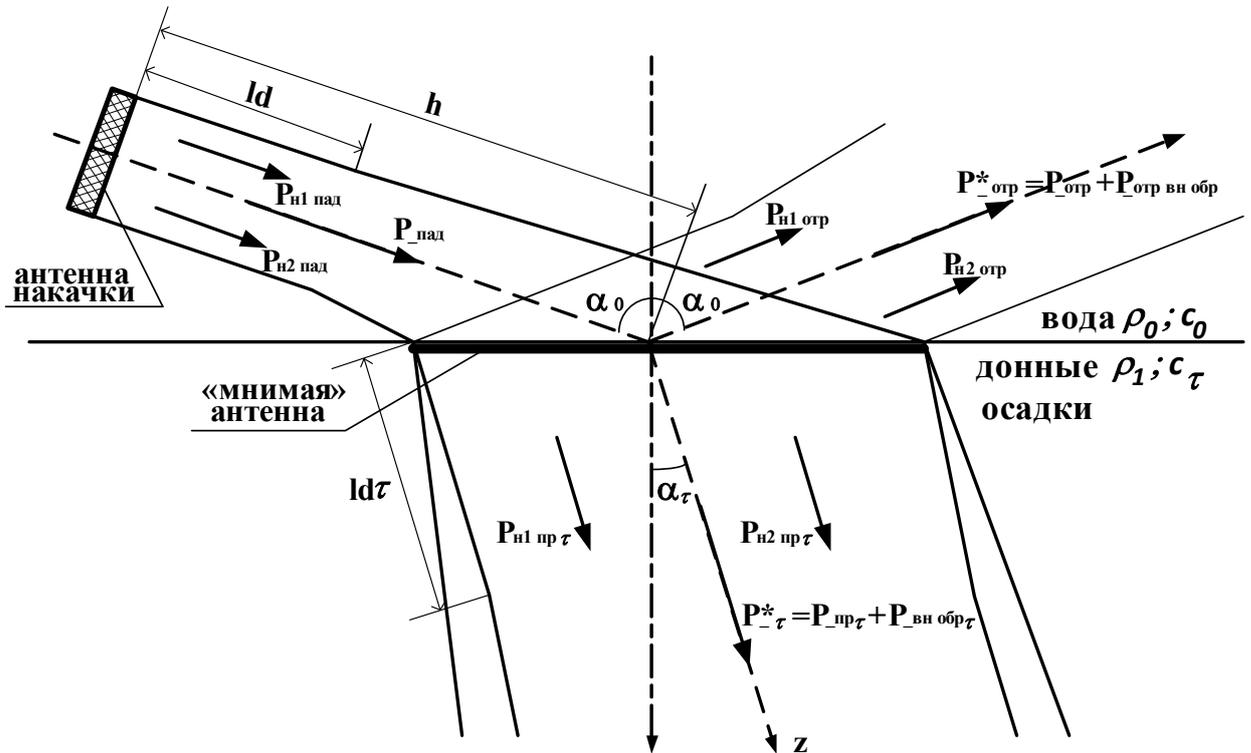


Рисунок 2 – Поле ПА при попадании границы раздела «вода – ДО» в область нелинейного взаимодействия исходных волн накачки при наклонном падении для углов, близких к критическим

Решение для расчета поля ПА в многофазной среде «вода – ДВО» при углах падения, близких к критическим, представлено в виде суммы трех интегралов:

$$\begin{aligned}
 P_{\tau-}(r, h, z) = & \frac{iQ}{L_D} \int_0^h \Phi_0(r, z) dz + \frac{iQ_{\tau 1} W_{\tau}}{L_{D\tau}} \int_0^h \Phi_{\tau 1}(r, z) dz + \\
 & + \frac{iQ_{\tau 2} W_{\tau}^2}{L_{D\tau}} \int_h^z \Phi_{\tau 2}(r, z) dz,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $Q, Q_{\tau 1}, Q_{\tau 2}$ – константы, включающие параметры сред взаимодействия и преобразователя накачки [4]; $\Phi(r, z)$ – подинтегральное выражение, являющееся передаточной функцией ПА для соответствующей среды

распространения [4]; h – расстояние до границы раздела; z – расстояние до точки наблюдения в ДО.

Первый интеграл в уравнении (6) описывает процесс взаимодействия исходных волн накачки в воде. Второй интеграл – процесс возбуждения сдвиговой ВРЧ при трансформации из воды в ДО, третий – генерацию полявнообразованной сдвиговой ВРЧ за счет взаимодействия трансформировавшихся из воды в ДО сдвиговых волн накачки.

На основании уравнения (6) произведены расчеты основных характеристик поля ПА в многофазной среде «вода – ДО» при углах падения, близких к критическим, которые будут приведены на графиках ниже, совместно с результатами экспериментов.

Для расчетов в качестве физических моделей ДО были выбраны глина и песок со следующими параметрами:

- глина - удельная плотность $\rho = 1440 \text{ кг/м}^3$; продольная скорость $c_l = 1830 \text{ м/с}$; поперечная скорость $c_\tau = 350 \text{ м/с}$; коэффициент прохождения при падении под углами близкими к критическим $W_\tau = 0,15$; коэффициент затухания сдвиговых волн накачки на частоте 275 кГц $\beta_{0\tau} = 60 \text{ дБ/м}$; коэффициент затухания сдвиговых ВРЧ в диапазоне частот от 10 до 50 кГц $\beta_\tau = 8 - 30 \text{ дБ/м}$; угол падения $\alpha = 65 - 75^\circ$, параметр нелинейности $\varepsilon = 8$;

- песок - удельная плотность $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$; продольная скорость $c_l = 1830 \text{ м/с}$; поперечная скорость $c_\tau = 250 \text{ м/с}$; коэффициент прохождения при падении под углами близкими к критическим $W_\tau = 0,10$; коэффициент затухания сдвиговых волн накачки на частоте 275 кГц $\beta_{0\tau} = 80 \text{ дБ/м}$; коэффициент затухания сдвиговых ВРЧ в диапазоне частот от 10 до 50 кГц $\beta_\tau = 12 - 40 \text{ дБ/м}$; угол падения $\alpha = 70 - 80^\circ$, параметр нелинейности $\varepsilon = 10$.

Для подтверждения правильности выбора данной теоретической модели, были проведены экспериментальные исследования основных характеристик поля ПА при работе в многофазной среде «вода – ДО» и возбуждении в ДО сдвиговых волн. Общий вид лабораторного бассейна и геометрия экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.

Рисунок 3 – Общий вид лабораторного бассейна и геометрия экспериментальных исследований

Антенна накачки параметрического гидролокатора с центральной частотой $f_0 = 275$ кГц и геометрическими размерами $a = 0,12$ м, $b = 0,09$ м, размещалась на координатном устройстве. Лабораторный бассейн имел размеры $2,0 \times 1,2 \times 1,9$ м. На его дне располагались в отдельных кюветах дегазированные глина и песок, выбранные в качестве физических моделей ДО. Толщина каждого слоя ДО составляла $0,7$ м. Сверху ДО заливались слоем воды глубиной $1,2$ м. Отдельно в глине и песке, для регистрации сигналов, помещались по 10 измерительных сферических гидрофонов. Они располагались на глубинах от $0,05$ до $0,5$ м, с шагом $0,05$ м. Для возбуждения в ДО сдвиговых волн c_τ , антенна накачки ориентировалась в пределах углов $\alpha_0 = 65 \div 80^\circ$ к нормали границы раздела. При проведении экспериментальных исследований диапазон значений ВРЧ варьировался от 10 до 50 кГц.

На первом этапе была произведена оценка давлений падающего, отраженного и прошедшего в ДО сигналов.

Для падающего и отраженного сигналов получены значения АЧХ частот накачки и ВРЧ, представленные на рисунках 4 и 5, соответственно.

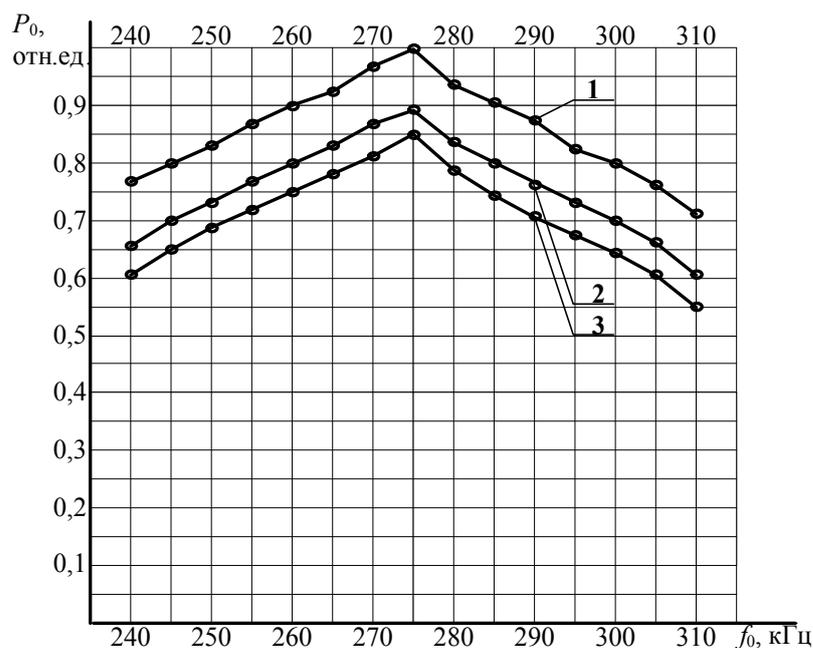


Рисунок 4 – АЧХ частот накачки (1 – прямой сигнал, 2 – отраженный от границы раздела «вода – песок», 3 – «вода – глина»)

Из данных зависимостей видно, что от границы раздела «вода – песок» отражается порядка 90 %, а от границы раздела «вода – глина» порядка 85 % от падающего излучаемого сигнала, оставшаяся часть энергии проходит непосредственно в ДО.

На втором этапе была получена экспериментально снятая зависимость амплитуды звукового давления сдвиговых ВРЧ от угла ввода колебаний α_0 к нормали границы раздела для каждого типа ДО. Из представленных на рисунке 6 графиков видно, что наибольшее проникновение и трансформация происходит в глине при угле падения $\alpha_0 \approx 76^\circ$, в песке $\alpha_0 \approx 70^\circ$.

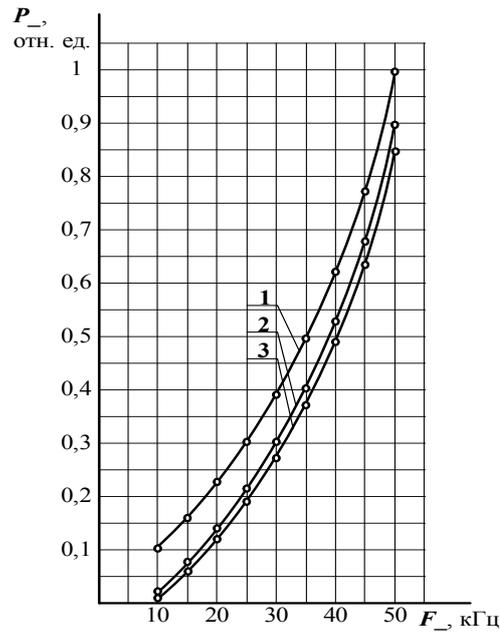


Рисунок 5 – АЧХ ВРЧ (1 – прямой сигнал, 2 – отраженный от границы раздела «вода – песок», 3 – «вода – глина»)

Распределения амплитуд звуковых давлений сигналов первичных и вторичных полей на оси до границы раздела и после нее следует отнести к наиболее информативным характеристикам процесса нелинейного взаимодействия, позволяющим составить наиболее полную физическую картину особенностей формирования ВРЧ.

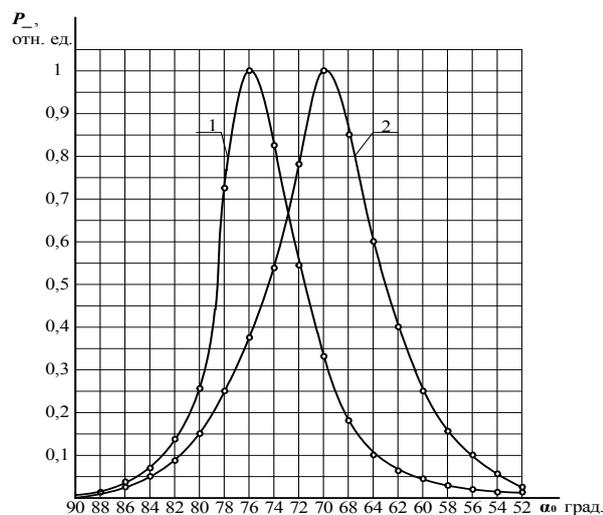


Рисунок 6 - Зависимость амплитуды звукового давления поперечных ВРЧ от угла ввода колебаний α_0 (1 - песок, 2 – глина).

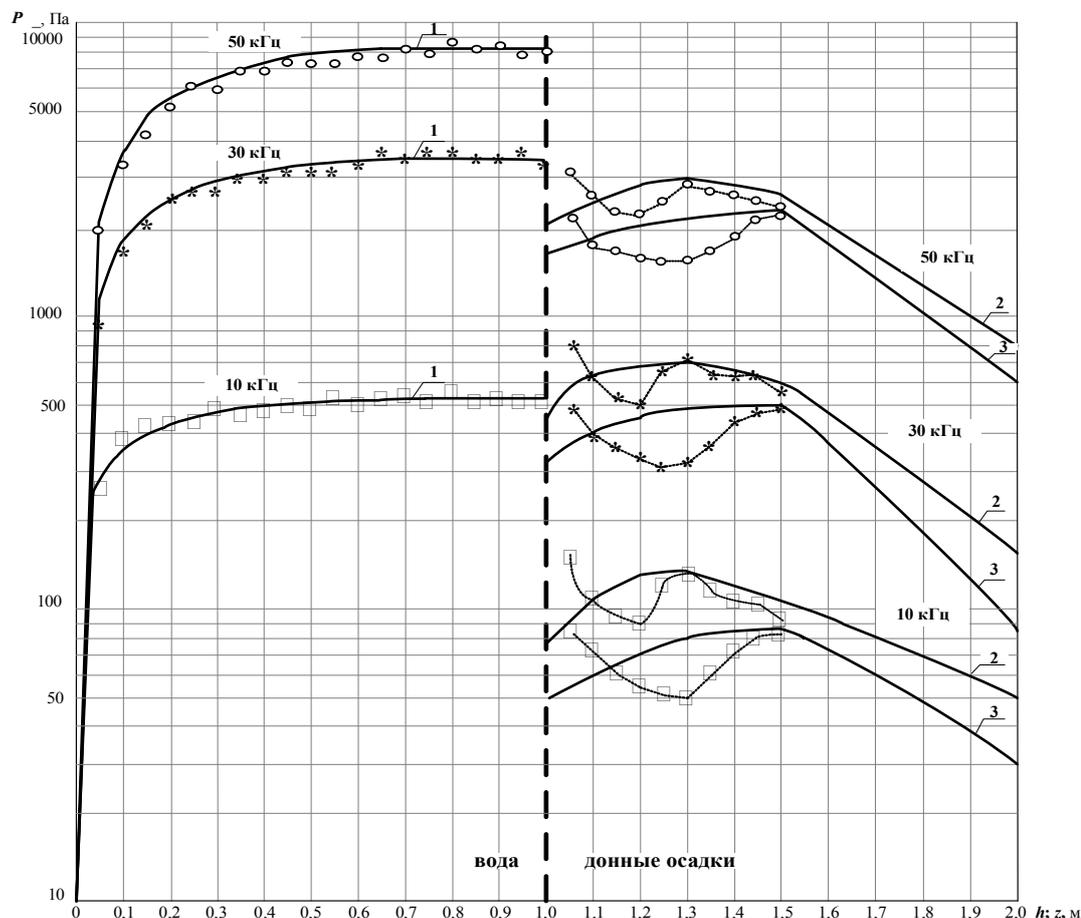


Рисунок 7 – Осевые распределения амплитуды звукового давления ВРЧ в воде и сдвиговых ВРЧ в ДО (1 – вода, 2 – глина, 3 – песок)

Так, на следующем этапе по формуле (1) были вначале рассчитаны, а затем экспериментально получены осевые распределения амплитуд звукового давления ВРЧ в воде до границы раздела и после нее сдвиговых ВРЧ в песке и глине, приведенные на рисунке 7.

Сплошными кривыми показаны расчетные результаты, значками со штриховыми кривыми – экспериментальные. Исследования проводились для частот $F_{\omega} = 10; 30; 50$ кГц. Из рисунка 7 видно, что в ДО, в зоне дифракции (до l_d) видна генерация сигнала сдвиговых волн с последующим его убыванием по заданному закону за счет затухания.

Амплитудно-частотные зависимости позволяют увидеть эффективность процессов нелинейного взаимодействия в средах. На рисунке 8 представлены графические зависимости АЧХ ВРЧ в воде и сдвиговых ВРЧ в ДО, полученные экспериментально на фиксированном расстоянии (для воды $h = 1$ м, для глины и песка $z = 0,5$ м). Измерения проведены в диапазоне ВРЧ от 10 до 50 кГц с шагом в 10 кГц.

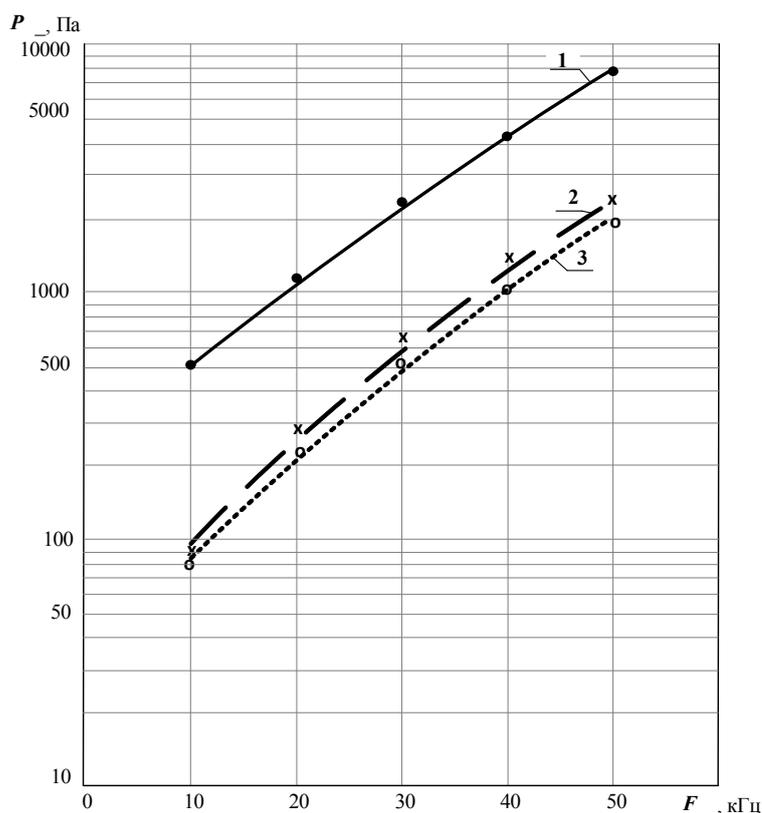


Рисунок 8 – АЧХ звукового давления ВРЧ в воде и АЧХ сдвиговых ВРЧ в ДО (1 – вода, 2 – глина, 3 – песок)

Полученные расчетные и экспериментальные зависимости АЧХ в ДО достаточно хорошо совпадают. Эффективность процессов нелинейного взаимодействия узких звуковых пучков в ДО возрастает с увеличением значений частоты сдвиговых ВРЧ.

Основным достоинством устройств и систем, работающих на принципах нелинейной гидроакустики, является возможность формирования высоконаправленного излучения звуковых пучков при малых габаритах исходного излучателя накачки [5]. Поэтому наиболее важной

характеристикой процесса нелинейного взаимодействия, как продольных [6], так и сдвиговых акустических волн в ДО, как и в воде, является поперечное распределение.

На рисунке 9 показаны поперечные распределения ВРЧ в воде, а на рисунках 10, 11 приведены для сдвиговых ВРЧ в глине и в песке соответственно, полученные расчетным путем (сплошные кривые) и экспериментально (отмечены маркерами). Эксперименты проводились на фиксированных расстояниях, для воды $h = 1$ м, для глины и песка $z = 0,5$ м, для значений ВРЧ 10; 30 и 50 кГц.

Из рисунков 9 - 11 видно, что традиционно для ПА, практически отсутствует боковое поле. С увеличением значений ВРЧ ширина поперечного распределения обужается.

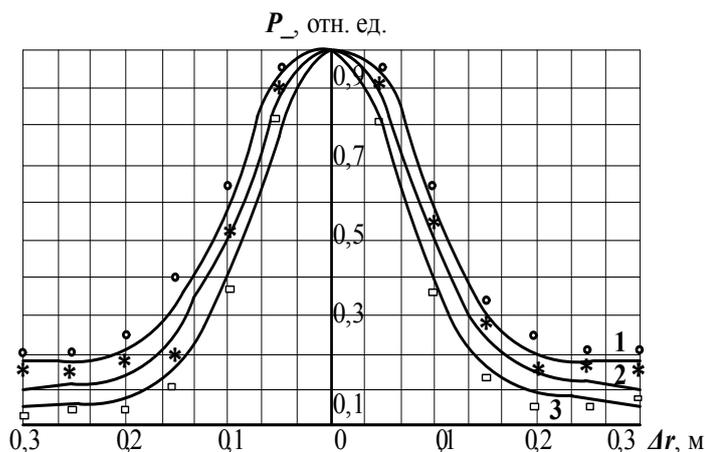


Рисунок 9 – Поперечное распределение амплитуды звукового давления ВРЧ в воде

Кроме того, поскольку исходная антенна накачки расположена под углом к границе раздела, то за счет разности хода лучей падающего звукового пучка происходит искажение поперечного распределения при формировании поля сдвиговых ВРЧ в ДО.

Необходимо отдельно отметить, что при проведении всех экспериментальных исследований, сдвиговые волны в глине и песке распознавались по временному положению сигналов от расстояния. При этом

с увеличением глубины в глине скорость изменялась в диапазоне от 330 до 380 м/с, в песке – от 220 до 270 м/с.

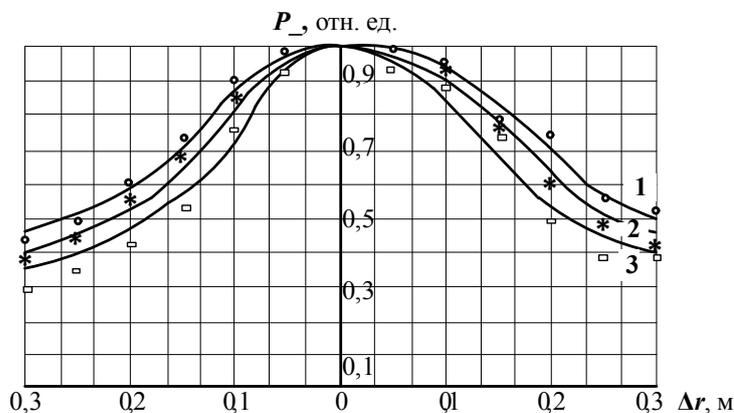


Рисунок 10 – Поперечное распределение амплитуды звукового давления сдвиговых ВРЧ в глине

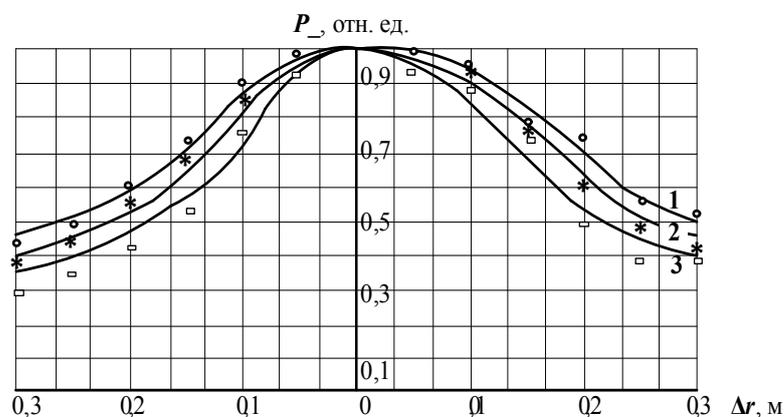


Рисунок 11 – Поперечное распределение амплитуды звукового давления сдвиговых ВРЧ в песке

На последнем этапе исследований проводились эксперименты доказывающие возможность использования сдвиговых волн в ДОВ эхолокационном режиме.

На глубине 0,3 м в глине и песке были зарыты алюминиевые пластины размерами 0,25 x 0,15 м, расположенные перпендикулярно к углам прихода сдвиговых волн. Приемный гидрофон крепился к платформе антенны

накачки. Полное расстояние, пройденное сигналом до объектов и обратно, составило 2,7 м. При этом скорость сдвиговой ВРЧ в глине составила 350 м/с, в песке – 250 м/с.

Геометрия данного эксперимента представлена на рисунке 12.

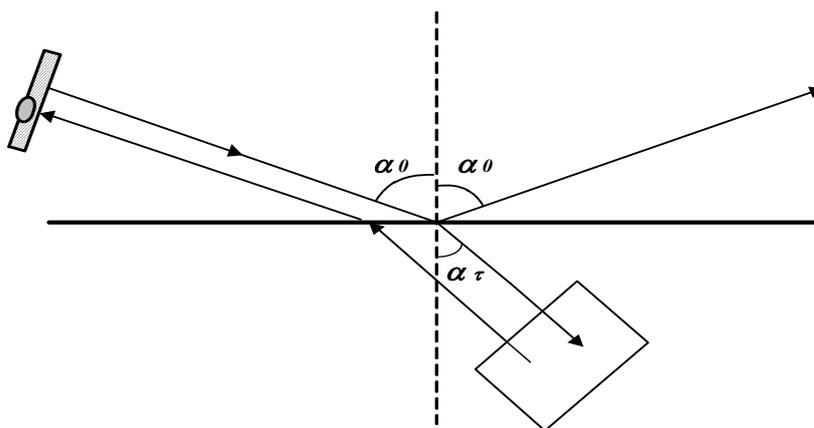


Рисунок 12 – Локационный режим, геометрия эксперимента

Для данного режима получены АЧХ сдвиговых волн, отраженных от объектов в глине и песке Их графики приведены на рисунке 13. Из графиков видно, что АЧХ носит традиционный характер для параметрических гидролокаторов.

Таким образом, представленные в работе результаты доказывают факт трансформации, возбуждения и генерации сдвиговых ВРЧ в ДО. Кроме того, данные исследования основных характеристик поля, создаваемого ПА в многофазной среде «вода – ДО» при наклонном падении на границу раздела под углами близкими к критическим, дают достаточно хорошее совпадение, что подтверждает факт правильности выбора физической модели эффективного возбуждения, генерации и распространения сдвиговых ВРЧ в ДО.

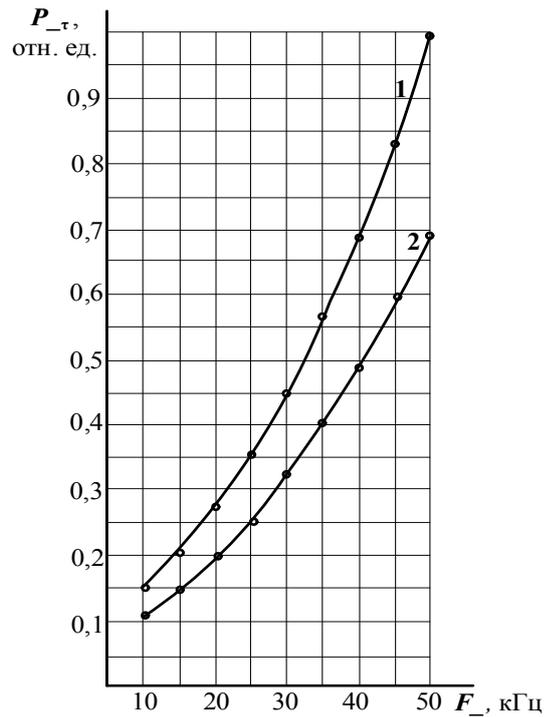


Рисунок 13 – АЧХ сдвиговых ВРЧ отраженных от объектов
(1 – глина, 2 – песок)

Предложенный в работе метод эхолокации можно использовать в параметрических гидролокаторах для стратификации ДО и обнаружения в них различных инородных целей.

Литература

1. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение. 1990.– 256 с.
2. Мюир Т. Дж. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков./ В кн.: Акустика морских осадков. – М.: Мир. 1977.– С.227 – 273.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеиздат. 1982.– 264 с.
4. Душенин Ю.В., Рыбачек М.С. Исследование взаимодействия акустических волн на неоднородной границе раздела двух сред.//

- Известия высших учебных заведений, журн. «Электромеханика», Новочеркасск, Изд-во НГТУ, 1995.– С.30 – 32.
5. Рыбачек М.С. Исследование взаимодействия акустических волн и разработка параметрического излучателя звука. Дис. канд. тех. наук, Таганрог, 1978.– 214 с.
 6. Душенин Ю.В., Гурский В.В. Исследование основных характеристик поля параметрической антенны в донных осадках при вертикальном падении пучка на границу раздела.// Известия ЮФУ, Технические науки. Тематический выпуск. «Экология 2013 – море и человек». Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. № 9. – С.109 – 114.

References

1. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokacii. [Parametric sonar antennas]. L.: Sudostroenie. 1990. 256 p.
2. Mjuir T. Dzh. Nelinejnaja akustika i ee rol' v geofizike morskih osadkov.[Nonlinear acoustics and its role in geophysics, marine sediments].V kn.: Akustika morskih osadkov. M.: Mir. 1977. pp.227 – 273.
3. Brehovskih L.M., Lysanov Ju.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana. [Theoretical Foundations of ocean acoustics]. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 264 p.
4. Dushenin Ju.V., Rybachek M.S. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij, zhurn. «Jelektromehanika», Novoчеркассk, Izd-vo NGTU, 1995. pp.30 – 32.
5. Rybachek M.S. Issledovanie vzaimodejstvija akusticheskikh voln i razrabotka parametricheskogo izluchatelja zvuka[Investigation of the interaction of acoustic waves and the development of parametric sound radiator]. Dis. kand. teh. nauk, Таганрог, 1978. 214 p.
6. Dushenin Ju.V., Gurskij V.V. Izvestija JuFU, Tehnicheskie nauki. Tematicheskij vypusk. «Jekologija 2013 – more i chelovek». Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. № 9. pp.109 – 114.