

УДК 534.23

АНОМАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВЕКТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ В АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

В.А. Щуров
А.В. Черкасов
Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина,
С.Б. Касаткин

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН¹
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского²
Институт проблем морских технологий ДВО РАН³

Выполнен анализ энергетической структуры звуковых полей в слоистых средах, предсказывающий возникновение резонансных явлений, сопровождающих захват энергии звуковых волн при полном внутреннем отражении. Получены аналитические оценки вертикальной компоненты вектора интенсивности и ее периодической изменчивости по продольной координате, характеризующие резонансную реакцию волновода. На основе теоретического анализа сделан важный вывод о возможности возбуждения в волноводе Пекериса обобщенной волны пограничного типа, не имеющей критической частоты. Однако эта волна принадлежит комплексному угловому спектру источника и характеризуется квадрупольным типом распределения горизонтальных потоков мощности в области определения. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие аномальные особенности поля вертикальной компоненты вектора интенсивности и вихревую структуру поля самого вектора интенсивности.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением ранее опубликованных работ [1–3] и посвящена проблеме моделирования звуковых полей в открытых слоистых волноводах. Однако само моделирование выполняется в новой для теоретической и прикладной гидроакустики несамосопряженной модельной постановке, которая является основой обобщенной теории волновых процессов в слоистых средах. Практический интерес такой постановки заключается в том, что она не только объясняет экспериментальные результаты аномального плана, не имевшие адекватного объяснения в рамках классической теории, но естественным путем приводит к новым теоретическим результатам, имеющим важное прикладное значение. В дополнение к ранее исследованным

в работах [1–3] новым явлениям рассмотрим более подробно вопрос об особенностях векторной структуры звуковых полей на примере наиболее интересного в практическом плане поля вектора интенсивности звука или вектора плотности потока мощности в звуковой волне. Дело в том, что структура этого векторного поля принципиально различается в классической модельной постановке, которая является самосопряженной модельной постановкой (СМП), и в предлагаемой несамосопряженной модельной постановке (НМП), которая физически более корректна при описании открытых волноводных систем. Здесь, как и в ранее опубликованных работах [1–3], название модельной постановки, самосопряженной или несамосопряженной, непосредственно связано с типом оператора, самосопряженного

или несамосопряженного, описывающего соответствующую граничную задачу. Математическая формулировка граничной задачи в НМП на примере классической задачи Пекериса дана в работе [4], а основы обобщенной теории волновых процессов в слоистых средах, построенной в рамках НМП, приведены в работе [5].

Принципиальное различие прежде всего заключается в том, что в классическом решении вертикальный поток мощности в суммарном поле нормальных волн равен нулю, как и вертикальная компонента вектора интенсивности. Это объясня-

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (423) 2312101, факс: (423) 2312573, e-mail: shchurov@poi.dvo.ru

² 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, тел.: (423) 2414968, факс: (423) 2517639.

³ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (423) 2432578, e-mail: kasatkas@marine.febras.ru

ется тем, что сама нормальная волна имеет структуру стоячей волны в поперечном сечении волновода. В обобщенном решении вертикальная компонента вектора интенсивности принципиально отлична от нуля, но является знакопеременной при изменении горизонтальной координаты. Это означает, что связанный с ней вертикальный поток мощности равен нулю в среднем за период осцилляций, сам вертикальный поток мощности никуда не излучается и является своеобразной резонансной реакцией полупространства на захват энергии волноводом и ее локализацию только в волноводе, но не в полупространстве. При этом в самом полупространстве устанавливается режим стоячей волны со скомпенсированными потоками мощности, вертикальными и горизонтальными.

Понятно, что детальное теоретическое и экспериментальное исследование векторных полей, связанных со скалярным полем звукового давления, стало возможным только после внедрения в практику акустических измерений векторных приемников и комбинированных приемников на их основе. Именно комбинированные приемники позволили изучать на хорошей метрологической основе структуру поля вектора интенсивности, который является важнейшей векторной характеристикой звукового поля, что и было отражено в пионерных работах [6, 7] по векторной акустике океана.

■ Новое модельное описание векторных звуковых полей

Можно сразу отметить, что в единственной теоретической работе [7] по скалярно-векторным методам в теоретической аку-

стике анализ векторных полей выполнен только для условий свободного пространства, но не для условий волновода. Структура векторных полей, формируемых в акустических волноводах, имеет свои естественные отличия, которые объясняются как наличием отражающих границ раздела, так и различиями модельного описания самого звукового поля. Поясним эти различия на примере векторной структуры звукового поля, создаваемого модельным источником в модельном волноводе Пекериса, который достаточно адекватен реальным гидроакустическим волноводам. Будем также считать, что рассматриваемое звуковое поле относится к дальней или волновой зоне, где оно представлено только набором нормальных волн дискретного спектра, а вкладом составляющих сплошного спектра можно пренебречь.

Вектор интенсивности в таком звуковом поле содержит потенциальную и вихревую составляющие, лучевая трактовка которых поясняется рис. 1. При отражении вектора интенсивности от свободной поверхности волновода обе его компоненты, вертикальная и горизонтальная, должны обратиться в нуль. При отражении потенциал-

ной составляющей нормальная компонента вектора интенсивности гасится противофазным отражением волны давления. Продольная компонента вектора интенсивности может быть погашена только противоположно направленной вихревой составляющей вектора интенсивности, которая возникает всякий раз при отражении потенциальной составляющей от свободной поверхности волновода. Процесс генерации вихревой составляющей при отражении вектора интенсивности от свободной поверхности описывается аналогичным образом и в классическом решении, т.е. в СМП, и в обобщенном решении, т.е. в НМП. Однако процедура продолжения поля нормальных волн в полупространство принципиально различается в сравниваемых модельных постановках.

В классическом решении суммарное поле представлено набором регулярных нормальных волн, каждая из которых продолжается в полупространство неоднородной расходящейся волной с убывающей амплитудой. Функция поперечного сечения для нормальной волны регулярного типа показана на рис. 1, а справа. Такое продолжение является непрерывным

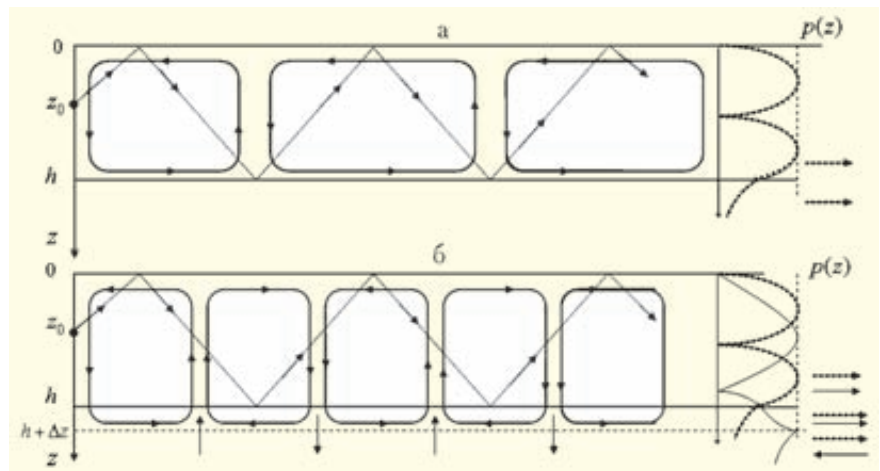


Рис. 1. Лучевая трактовка отражения вектора интенсивности от границ волновода в самосопряженной (а) и в несамосопряженной (б) модельных постановках

по давлению и нормальной компоненте вектора колебательной скорости и соответственно по нормальной компоненте вектора интенсивности. При этом касательная компонента вектора интенсивности оказывается непрерывной с весом, а в качестве весового коэффициента выступает плотность среды. При таком продолжении звукового поля и вектора интенсивности вихревая составляющая вектора интенсивности при его отражении от импедансной границы не возникает. В самом поле вихревой составляющей направление вращения вихрей остается постоянным. При этом вертикальная компонента вектора интенсивности оказывается скомпенсированной на границах вихрей и в любом сечении волновода. Эта ситуация поясняется рис. 1, а. Такая структура звукового поля нормальных волн с нулевым вертикальным потоком мощности полностью соответствует структуре отдельной нормальной волны, которая построена как стоячая волна в поперечном сечении волновода, для которой вертикальный поток мощности также равен нулю.

В обобщенном решении суммарное поле представлено набором регулярных и обобщенных нормальных волн, которые возникают парами. В этой паре волн обобщенная составляющая продолжается в полупространство неоднородной расходящейся волной с экспоненциально растущей амплитудой, но только до горизонта полного внутреннего отражения. Ниже этого горизонта нормальная волна продолжается сходящейся волной отдачи с убывающей амплитудой. Функции поперечного сечения для пары нормальных волн, регулярной и обобщенной, показаны на рис. 1, б справа. Такое

продолжение поля является непрерывным только по импедансу, т.е. по отношению давления к нормальной компоненте вектора колебательной скорости. При этом в самом звуковом поле в полупространстве горизонтальные потоки мощности оказываются скомпенсированными, а горизонтальная компонента вектора интенсивности оказывается равной нулю на самой импедансной границе. Это означает, что при отражении от импедансной границы, как и в случае отражения от свободной поверхности, потенциальная составляющая вектора интенсивности будет порождать вихревую составляющую, как это показано на рис. 1, б. При отражении вектора интенсивности от обеих границ волновода в самом звуковом поле появляется знакопеременная вихревая составляющая. В таком поле вертикальная компонента вектора интенсивности будет усиливаться на стыках вихрей и осциллировать при изменении горизонтального расстояния. Иначе говоря, в обобщенном решении вертикальная компонента вектора интенсивности принципиально отлична от нуля, отличен от нуля и связанный с ней локальный поток мощности. При интегрировании вертикальной компоненты вектора интенсивности по периоду осцилляций мы получаем нулевое значение интегрального потока мощности. Это означает, что вертикальный поток мощности никуда не излучается и является связанным, как и в любой резонансной структуре.

Физическая причина появления в суммарном поле нормальных волн ненулевого, но осциллирующего вертикального потока мощности с нулевым средним как раз и связана с парной структурой нормальных волн в обобщенном решении.

Каждая пара волн продолжается в полупространство полем со скомпенсированными потоками мощности, горизонтальными и вертикальными, т.е. полем со структурой, характерной для объемного резонанса полупространства. Сам горизонт полного внутреннего отражения, на котором все полевые величины терпят разрыв с нулевым средним, играет роль вторичного источника возмущения, который описывается обобщенной поверхностной δ -функцией, локализованной на этом горизонте. Объемный резонанс в полупространстве порождает толщинный (поперечный) резонанс в самом волноводе, характерным выражением которого и является осциллирующая вертикальная компонента вектора интенсивности, величина которой соизмерима с величиной горизонтальной компоненты вектора интенсивности. Каждая пара волн зарождается на частотах продольного резонанса, на которых звуковое поле в волноводе также приобретает структуру стоячей волны с нулевым горизонтальным потоком мощности, как и в полупространстве. По существу такой режим соответствует объемному резонансу и в волноводе, и в полупространстве.

Резонансные явления в жидком волноводе типа волновода Пекериса легко наблюдаются в волноводе типа берегового клина при широкополосном возбуждении и были предметом детального теоретического анализа, выполненного в работе [3], там же приведены результаты эксперимента, полностью соответствующие выводам обобщенной теории. В этой работе анализировались результаты интереснейшего эксперимента, подробно описанного в работе [8], в котором поле нормальных волн в береговом клине

возбуждалось расположенным в воздухе широкополосным источником, роль которого играл винт вертолета. Резонансное возбуждение первой пары нормальных волн, регулярной и обобщенной, при пролете вертолета вблизи береговой черты сопровождалось значительным ростом амплитуды сигнала, принимаемого донным приемником на расстоянии 1 км от ребра клина.

Однако в волноводе Пекериса существует одна пара нормальных волн обобщенного типа, которая не имеет критической частоты. Это означает, что такой тип волнового движения существует на всех частотах, включая самые низкие, на которых невозможен захват волноводом нормальных волн высшего порядка. Одна из этих связанных волн, а именно водная составляющая, локализована на горизонте источника z_0 в водной среде, а другая, грунтовая, локализована на горизонте полного внутреннего отражения $h + z_n$ в полупространстве. Обобщенная грунтовая составляющая полностью аналогична обобщенной придонной волне пограничного типа, рассмотренной нами в работе [2], там же приведено экспериментальное подтверждение ее существования.

■ Обобщенная придонная волна нулевого порядка в волноводе Пекериса

Нормальные волны, не имеющие критической частоты, принято называть модами нулевого порядка. Хорошо известно, что в наборе нормальных волн волновода Пекериса отсутствует нормальная волна нулевого порядка, которая обладала бы нужными свойствами непрерывности во всей области определения. Однако в волново-

де Пекериса можно построить обобщенную придонную волну (ОПВ) нулевого порядка, соответствующую полюсу коэффициента отражения. Такая волна отвечает комплексному угловому спектру источника, а соответствующая ей собственная функция является непрерывной по давлению и нормальной компоненте колебательной скорости только на импедансной границе. Однако для ОПВ, как и для всех нормальных волн обобщенного типа, во всей области определения выполняется лишь условие непрерывности по импедансу. Для выяснения оптимальных условий ее возбуждения необходимо выяснить энергетику обобщенной пограничной волны. Дело в том, что в свободном пространстве спектральные составляющие, принадлежащие комплексному угловому спектру модельного источника, возбуждают встречные неоднородные волны с нулевым суммарным горизонтальным потоком мощности, образующие на самом горизонте источника стоячую волну с нулевым в среднем вертикальным потоком мощности. Иначе говоря, модельный источник для составляющих вещественного углового спектра является излучателем монопольного типа, а для составляющих комплексного углового спектра является излучателем дипольного типа с нулевым суммарным горизонтальным потоком мощности. В этом случае волновое движение оказывается вырожденным по всем спектральным составляющим комплексного углового спектра источника.

Однако вырождение снимается, когда источник расположен вблизи границы раздела двух полупространств. В этом случае вырожденной оказывается только одна спектральная составляющая, соответствующая

полюсу коэффициента отражения, как это пояснялось в работе [2]. Эта спектральная составляющая, названная обобщенной придонной волной (ОПВ) пограничного типа, существует в двух модификациях. Одна из них локализована вблизи горизонта модельного источника и названа водной составляющей, соответствующей нулю коэффициента отражения. Другая составляющая локализована вблизи горизонта полного внутреннего отражения или горизонта мнимого источника и названа грунтовой составляющей, соответствующей полюсу коэффициента отражения. Обе составляющие удовлетворяют необходимым условиям непрерывности на импедансной границе, но продолжают на всю область определения обобщенными функциями с обобщенными производными. В свою очередь, пара источников, модельный и мнимый, образуют в сумме либо излучатель диполь-дипольного типа, либо излучатель квадрупольного типа в зависимости от ориентации горизонтальных потоков мощности. Для излучателя диполь-дипольного типа суммарная мощность, излучаемая в горизонтальном направлении, отлична от нуля. Для излучателя квадрупольного типа суммарная излучаемая мощность остается равной нулю, а сам тип волнового движения оказывается вырожденным. Вырождение ОПВ квадрупольного типа снимается только при учете потерь в реальной морской среде и реальном морском дне, которые существенно больше потерь в морской среде. В этом случае появляется отличный от нуля вертикальный поток мощности в обеих средах и работает механизм преломления вектора плотности потока

мощности (вектора интенсивности) на границе раздела.

В слоистом пространстве, например, в волноводе Пекериса, вырождение пограничного волнового движения квадрупольного типа снимается еще до учета потерь в реальных средах, т.е. по чисто геометрическим причинам. Снятие вырождения означает, что баланс горизонтальных потоков мощности нарушается, а суммарный поток мощности, приходящийся на парное волновое движение типа ОПВ с квадрупольным распределением горизонтальных потоков мощности, оказывается положительно определенным даже в волноводе с идеальными параметрами. Его величина, или энергоемкость, в существенной мере определяет амплитуду ОПВ, которая тем выше, чем меньше энергоемкость данного типа волнового движения. Иначе говоря, в слоистом пространстве комплексный угловой спектр модельного источника «активизируется» и может возбуждать неоднородные волны пограничного типа. К таким волнам пограничного типа относятся, например, волны Рэлея и Шолте, которые не только физически наблюдаемы в реальном эксперименте, но и имеют важное практическое применение. В то же время ОПВ диполь-дипольного типа в условиях волновода может быть реализована как волна с положительно определенным потоком мощности только на частотах, больших первой критической, т.е. в составе пары нормальных волн первого порядка.

Существование волн пограничного типа на границе раздела двух жидких сред (морское дно в модельном представлении считается жидким полупространством) считалось невозможным в рамках классической

теории волновых процессов в слоистых сред. Объясняется это тем, что при построении классического суммарного решения комплексный угловой спектр источника не участвует. Обобщенная теория дает принципиально иное описание самого зарождения волнового процесса через явление продольного резонанса, и как следствие в этом описании появилась обобщенная нормальная волна нулевого порядка, структура которой также соответствует режиму продольного резонанса.

Структура функций поперечного сечения и структура волновых функций в обобщенной придонной волне нулевого порядка с квадрупольной структурой горизонтальных потоков мощности поясняется рис. 2. Структура функций поперечного сечения и структура потенциальной составляющей вектора интенсивности поясняется рис. 2, а, структура потоков мощности в вихревой составляющей вектора интенсивности поясняется рис. 2, б. Как отмечалось выше, обоб-

щенная придонная волна нулевого порядка со структурой квадрупольного типа не является единственной формой пограничного волнового движения. На частотах, больших первой критической, к ней добавляется обобщенная придонная волна первого порядка с дипольной структурой горизонтальных потоков мощности. Однако именно ОПВ квадрупольного типа обладает всеми характерными особенностями, присущими пограничному волновому движению, которые анализируются ниже.

Скорость распространения ОПВ квадрупольного типа c_n и горизонт полного внутреннего отражения $h + z_n$ определены в работе [2]. Мощность $E_0(z_0, k_1 h)$, приходящаяся на пару волн, нормированная на мощность источника, излучаемую в свободное пространство, поясняется рис. 3 в зависимости от нормированного горизонта источника $z_{01} = z_0/h$ и частотного параметра $k_1 h$ (k_1 – волновое число в водной среде, h – глубина волновода). Можно

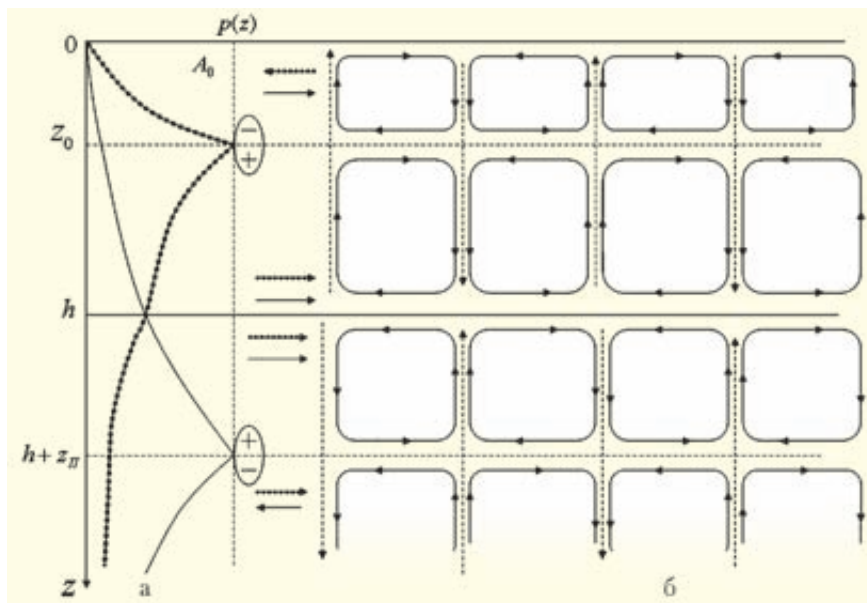


Рис. 2. Структура потоков мощности в потенциальной (а) и вихревой (б) составляющих вектора интенсивности в обобщенной придонной волне квадрупольного типа

отметить, что мощность, приходящаяся на ОПВ, монотонно растет с ростом частоты и горизонта излучения вплоть до значения $z_{01} = 0,9$ (рис. 3, а), а затем уменьшается до нуля (рис. 3, б) при дальнейшем увеличении горизонта источника. Последнее означает, что при нахождении модельного источника на импедансной границе ОПВ вырождается в стоячую волну резонансного типа с нулевым горизонтальным потоком мощности и нулевым в среднем вертикальным потоком мощности. Сам вертикальный знакопеременный поток мощности является самым ярким индикатором резонансного характера звукового поля, возбуждаемого в волноводе комплексным угловым спектром источника.

Рис. 4 поясняет зависимость амплитуды ОПВ на горизонте источника $A_0(z_0, k_1 h)$ от частотного параметра и горизонта источника. Амплитуда ОПВ монотонно растет с ростом частоты и горизонта излучения, причем в идеальных средах, лишенных каких-либо потерь, этот рост ничем не ограничен. Последнее обстоятельство также связано с тем, что в предельном случае, когда модельный источник приближается к границе раздела, встречные потоки мощности в ОПВ полностью компенсируются, а суммарное волновое движение вырождается в стоячую волну резонансного типа, т.е. снова становится вырожденным. Вырождение волнового движения в этом частном случае, как и в ранее рассмотренном случае распространения ОПВ вблизи границы раздела двух сред, может быть снято только учетом потерь в реальных средах.

Рисунок 5 поясняет зависимость отношения амплитуды

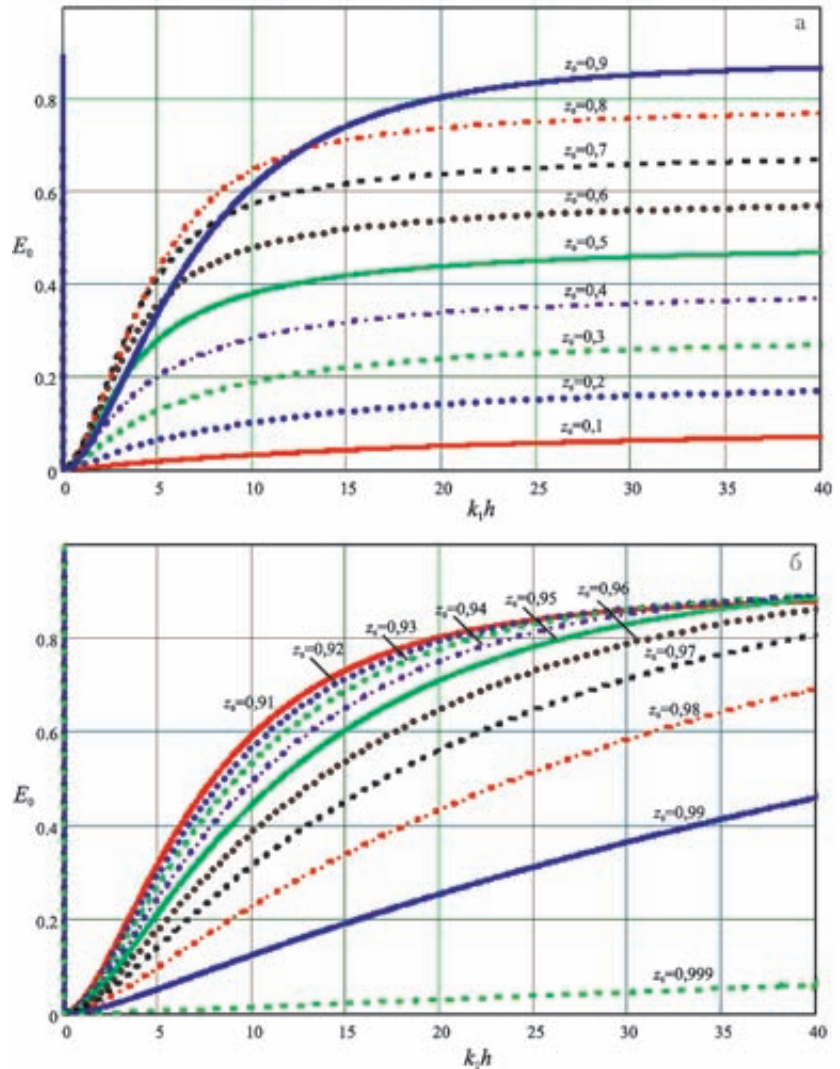


Рис. 3. Зависимость нормированной мощности обобщенной придонной волны от горизонта источника и частотного параметра: а – $z_{01} = 0,1 - 0,9$; б – $z_{01} = 0,91 - 0,999$

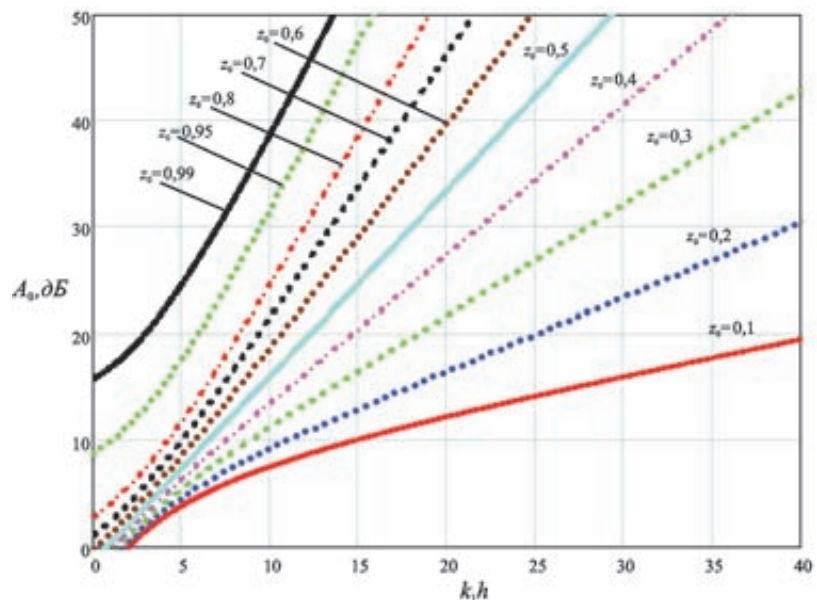


Рис. 4. Зависимость амплитуды ОПВ на горизонте источника $A_0(z_0, k_1 h)$ от частотного параметра и горизонта источника

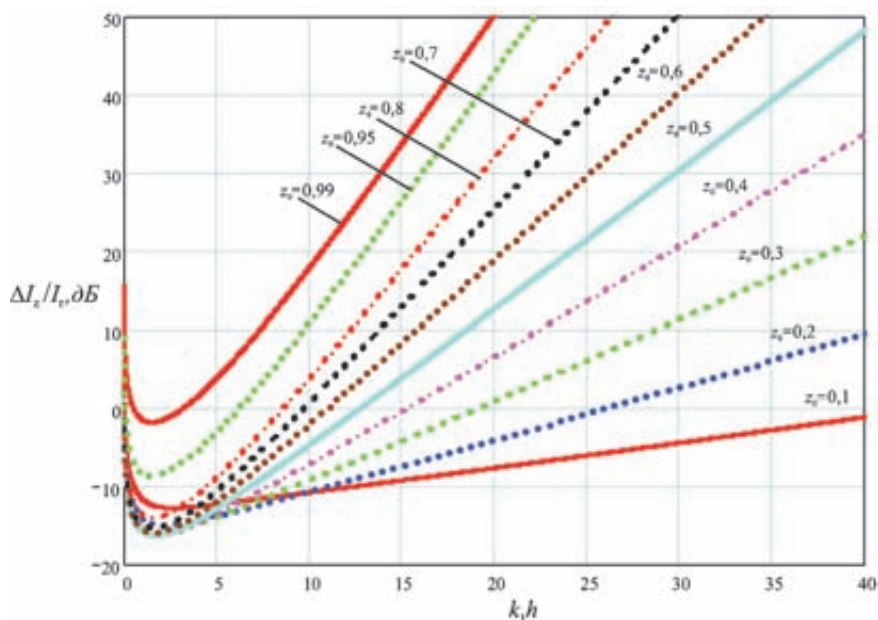


Рис. 5. Зависимость отношения амплитуды вертикальной компоненты вектора интенсивности на горизонте источника к максимальному значению амплитуды горизонтальной компоненты вектора интенсивности от параметров z_0 , $k_1 h$

вертикальной компоненты вектора интенсивности на горизонте источника к максимальному значению амплитуды горизонтальной компоненты вектора интенсивности от тех же параметров z_0 , $k_1 h$. Амплитуда вертикальной компоненты вектора интенсивности монотонно растет с ростом частоты и горизонта излучения по мере его приближения к границе раздела. Можно также отметить, что максимальное значение вертикальной компоненты вектора интенсивности может превосходить максимальное значение амплитуды горизонтальной компоненты вектора интенсивности, что объясняется резонансным характером возбуждения вертикальной компоненты вектора интенсивности и самого поля ОПВ.

В реальных средах с потерями на поглощение максимум амплитуды ОПВ будет обратно пропорционален декременту затухания звуковой волны в рабочей среде (или пропорционален добротности). Кроме того, существенное различие потерь на поглощение звука в морской

воде и верхнем слое дна осадочного типа приведет к нарушению баланса встречных потоков мощности, образующих ОПВ, что также исключает режим стоячей волны и ограничивает рост ее амплитуды в предельном случае, когда модельный источник устанавливается непосредственно на границе раздела (на морском дне).

Обобщенная придонная волна нулевого порядка выгодно отличается от остальных пар нормальных волн тем, что для нее отсутствует критическая частота, а следовательно, на достаточно низких частотах, меньших первой критической, она останется единственной обобщенной нормальной волной, представляющей волновое движение в волноводе и придонном слое, ограниченном снизу горизонтом полного внутреннего отражения. Кроме того, дисперсионные искажения при распространении ОПВ могут быть минимальными при сохранении селективности ее возбуждения. Однако в самом волновом процессе велика роль резонансных явлений, поэтому скорость пе-

реноса энергии, или групповая скорость ОПВ, может быть отлична от фазовой скорости, что может служить причиной дисперсионных искажений.

Из приведенных оценок следует, что ОПВ возбуждается наиболее интенсивно водным источником, горизонт которого приближается по возможности к импедансной границе раздела, а измеритель вертикальной компоненты вектора интенсивности находится на самом горизонте источника или по возможности вблизи него. При удалении приемника вертикальной компоненты вектора интенсивности от горизонта источника ее величина убывает примерно со скоростью 15–20 дБ на длину волны, если сама ОПВ возбуждается в волноводе с морским дном осадочного или песчаного типа. Общий вид звукового поля, возбуждаемого модельным источником в волноводе, показан на рисунках 6, 7 для различных положений горизонта источника и частотного параметра $k_1 h$. Параметры модельного волновода Пекериса, принятые в расчетах, соответствуют морскому дну песчаного типа. Горизонтальное расстояние и горизонт источника нормированы на глубину волновода.

На рисунках хорошо видны горизонты локализации ОПВ (горизонт источника и горизонт полного внутреннего отражения) и характерная локализация в придонном слое обобщенных нормальных волн высшего порядка, среди которых доминирующая роль принадлежит первой обобщенной нормальной волне, которая также вырождается в придонную волну пограничного типа. Первая обобщенная нормальная волна имеет дипольную структуру горизонтальных потоков мощности и вытекает на другой, но близкий горизонт полного

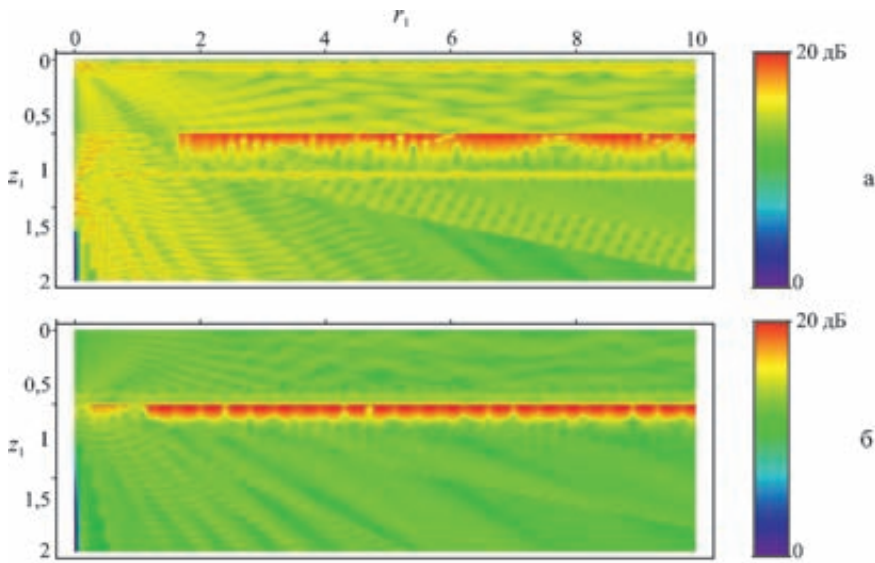


Рис. 6. Поле звукового давления в волноводе Пекериса, образованное приповерхностным источником $z_{01} = 0,1$ (а) и придонным источником $z_{01} = 0,9$ (б); $k_1 h = 50$

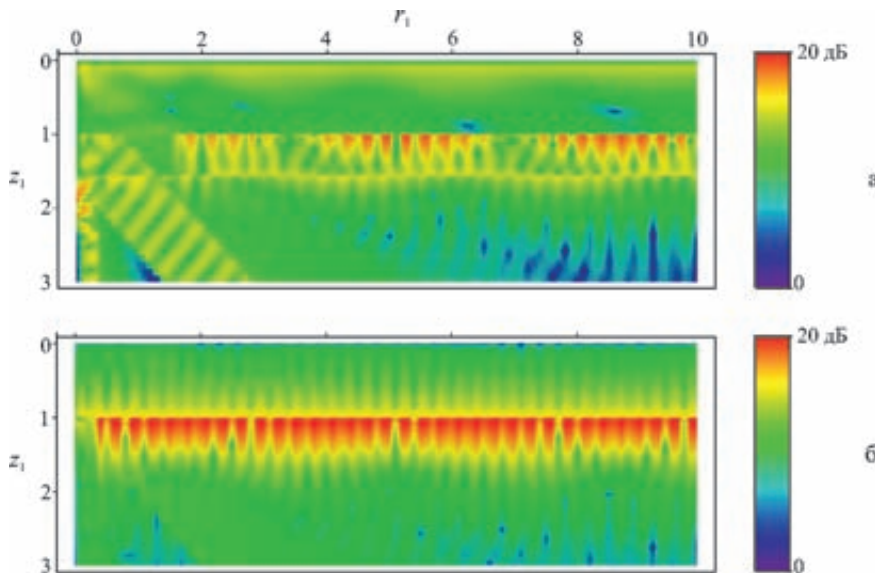


Рис. 7. Поле звукового давления в волноводе Пекериса, образованное приповерхностным источником $z_{01} = 0,1$ (а) и придонным источником $z_{01} = 0,9$ (б); $k_1 h = 10$

внутреннего отражения. При уменьшении частотного параметра уменьшается и количество возбуждаемых в волноводе нормальных волн, а в ситуации $k_1 h = 10$ в волноводе возбуждаются ОПВ нулевого порядка и две пары нормальных волн высшего порядка. В этом случае картина интерференции волн в придонном слое упрощается и соответствует крупномасштабным биениям пар волн нулевого и первого и второго порядка. Можно также отметить замет-

ный рост амплитуды ОПВ по мере приближения горизонта источника к границе раздела, а также заметный вклад вытекающих нормальных волн комплексного спектра в суммарное поле в полупространстве.

■ Экспериментальные исследования векторной структуры звукового поля

Первые результаты по экспериментальному исследованию

поля вектора интенсивности и его вертикальной компоненты, выполненные с применением комбинированных приемников, были опубликованы в работах [9–11]. В этих экспериментах, проводимых в условиях мелкого моря, комбинированный приемник устанавливался стационарно на определенном горизонте в водной среде, а в качестве источника звука использовалось шумящее судно, проходящее мимо приемной системы по определенному галсу. Сигнальная информация обрабатывалась в реальном масштабе времени методами спектрального анализа с вычислением искомых значений звукового давления, компонент вектора колебательной скорости и вектора интенсивности на соответствующих проходных характеристиках. По условиям эксперимента все проходные характеристики снимались в дальней или волновой зоне источника, где суммарное поле целиком определялось набором нормальных волн различных номеров, каждая из которых построена как стоячая волна с нулевым вертикальным потоком мощности.

В соответствии с результатами классической теории волновых процессов в слоистых средах, построенной в самосопряженной молекулярной постановке, вертикальная компонента вектора интенсивности в таком звуковом поле должна равняться нулю. Это условие должно выполняться с точностью до небольших по величине потоков взаимной мощности, уровень которых на два-три порядка меньше уровня горизонтального потока мощности. Такой же порядок имеет и вертикальный поток мощности, связанный с потерями на поглощение в реальном морском дне,

пропорциональный декременту затухания звука в морском дне. Экспериментальные результаты полностью противоречат выводам классической теории, но хорошо соответствуют выводам и оценкам обобщенной теории. На рис. 8 приведены проходные характеристики для звукового давления и вертикальной компоненты вектора интенсивности, полученные в мелком море глубиной 120 м при глубине установки измерительной системы на горизонте 70 м в диапазоне расстояний между измерительной системой и шумящим судном 1,5–6 км. Проходные характеристики рис. 8, А, С относятся к звуковому давлению, характеристики рис. 8, В, D относятся к вертикальной компоненте вектора интенсивности $\pm I_z$. Рисунки 8, А, В относятся к частоте 110 Гц, рис. 8, С, D относятся к частоте 23 Гц.

На рис. 9 приведены те же проходные характеристики для звукового давления, вертикальной компоненты вектора интенсивности и угла падения для вектора интенсивности в более крупном масштабе. Рисунки 9, А–С относятся к рабочей частоте 110 Гц, рис. 9, D–F относятся к частоте 23 Гц.

На всех проходных характеристиках для звукового давления хорошо видна интерференционная структура звукового поля, связанная с межмодовой интерференцией.

Принципиально иную структуру имеют проходные характеристики для вертикальной компоненты вектора интенсивности $\pm I_z$ и угла падения. Эти характеристики имеют периодическую структуру с нулевым средним, причем, судя по углу скольжения, вертикальная компонента вектора интенсивности вовсе

не является малой и соизмерима с горизонтальной компонентой. Осцилляционный характер этих величин принципиально связан с резонансной реакцией поля нормальных волн, захваченных волноводом, которые продолжают в полупространство полем типа стоячих волн со скомпенсированным горизонтальным потоком мощности. При этом неизбежно образуется горизонт полного внутреннего отражения, на котором вертикальная компонента вектора интенсивности терпит разрыв, зависимость которого от горизонтальной координаты оказывается периодической с нулевым средним. При понижении частоты увеличивается уровень вертикальной компоненты вектора интенсивности в сравнении с горизонтальной компонентой, увеличивается и угол скольжения (до 60 – 70°). Полученные в

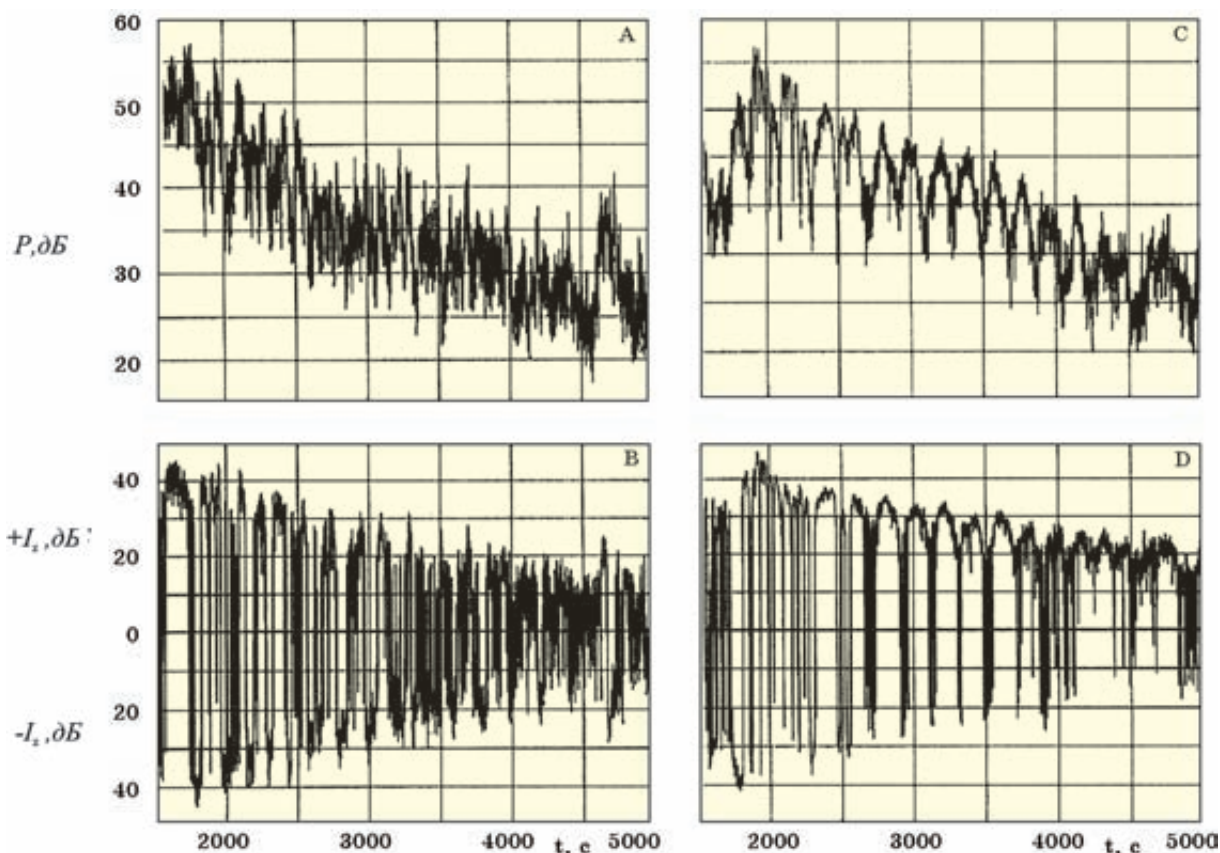


Рис. 8. Проходные характеристики для звукового давления (А, С) и вертикальной компоненты вектора интенсивности $\pm I_z$ (В, D) на частотах 110 Гц (А, В) и 23 Гц (С, D)

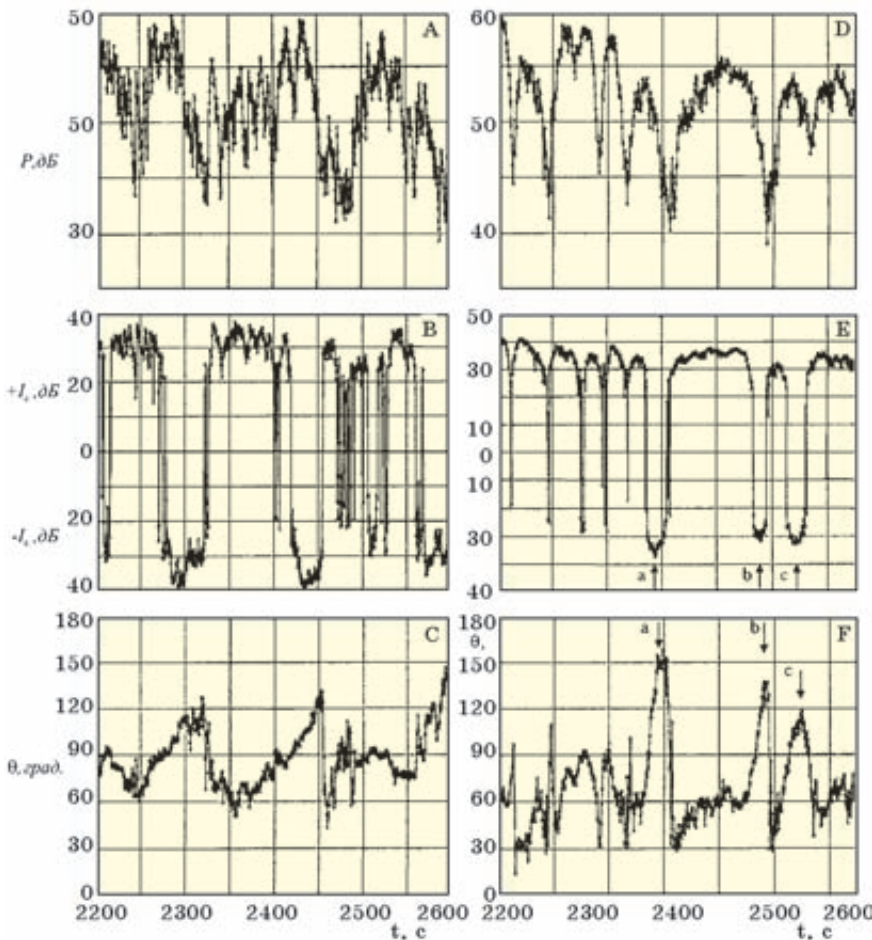


Рис. 9. Проходные характеристики для звукового давления (A, D), вертикальной компоненты вектора интенсивности $\pm I_z$ (B, E) и угла падения (C, F) для вектора интенсивности на частотах 110 Гц (A–C) и 23 Гц (D–F)

эксперименте данные позволили численно оценить угловую компоненту вихря вектора интенсивности, которая оказалась знакопеременной, как и предсказывает обобщенная теория. Различие вихревой структуры вектора интенсивности в сравниваемых модельных постановках пояснялось нами рис. 1, а экспериментальные результаты подтверждают именно ту структуру вихря, которая соответствует обобщенной теории.

Другой эксперимент по исследованию векторной структуры звукового поля был проведен в бухте Витязь при глубине моря в месте установки измерительной системы 28 м, сама измерительная система устанавливалась на расстоянии 1 м от дна. Экспериментальные результаты

появляются рисунками 10–12. Характерные особенности проходных характеристик для рабочей частоты 132 Гц не имеют существенных отличий от аналогичных характеристик, полученных в предыдущем эксперименте. Принципиальная особенность этого эксперимента заключается в том, что проходные характеристики на рабочей частоте 33 Гц получены в условиях, когда в волноводе существует (в соответствии с классическим описанием) всего лишь одна нормальная волна. В этих условиях вертикальный поток мощности в поле нормальной волны тождественно равен нулю, а межмодовая интерференция принципиально исключается. Однако хорошо видно, что осциллирующий характер

зависимости от расстояния (от времени) на проходной характеристике для вертикальной компоненты вектора интенсивности $\pm I_z$ сохранился и в этом случае. Эта особенность однозначно свидетельствует о том, что причиной возникновения отличного от нуля вертикального потока мощности с осциллирующей структурой является именно обобщенная придонная волна нулевого порядка и ее особая структура на горизонте источника и на горизонте полного внутреннего отражения, которая пояснялась выше рис. 2.

В соответствии с выводами обобщенной теории в мелководном водоеме типа бухты Витязь на частоте 33 Гц возбуждаются две пары нормальных волн нулевого и первого порядков, как это хорошо видно на рис. 7. Каждой из них соответствует свой горизонт локализации знакопеременного вертикального потока мощности, а в поле звукового давления сохраняется межмодовая интерференция, которая хорошо подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 10, б.

Можно также отметить, что угол падения для вектора интенсивности распределен несимметрично относительно горизонтального направления $\varphi = 90^\circ$, что означает преобладающее значение вертикального потока мощности, направленного в сторону морского дна. Эта асимметрия угла падения, безусловно, связана с потерями в морском дне, которые существенно выше потерь в морской воде. Иначе говоря, резонансные колебания водной среды, которые возбуждаются нулевой модой и сопровождаются значительной по величине вихревой составляющей вектора интенсивности, эффективно демпфируются морским дном, а суммарный вертикальный поток мощности приобре-

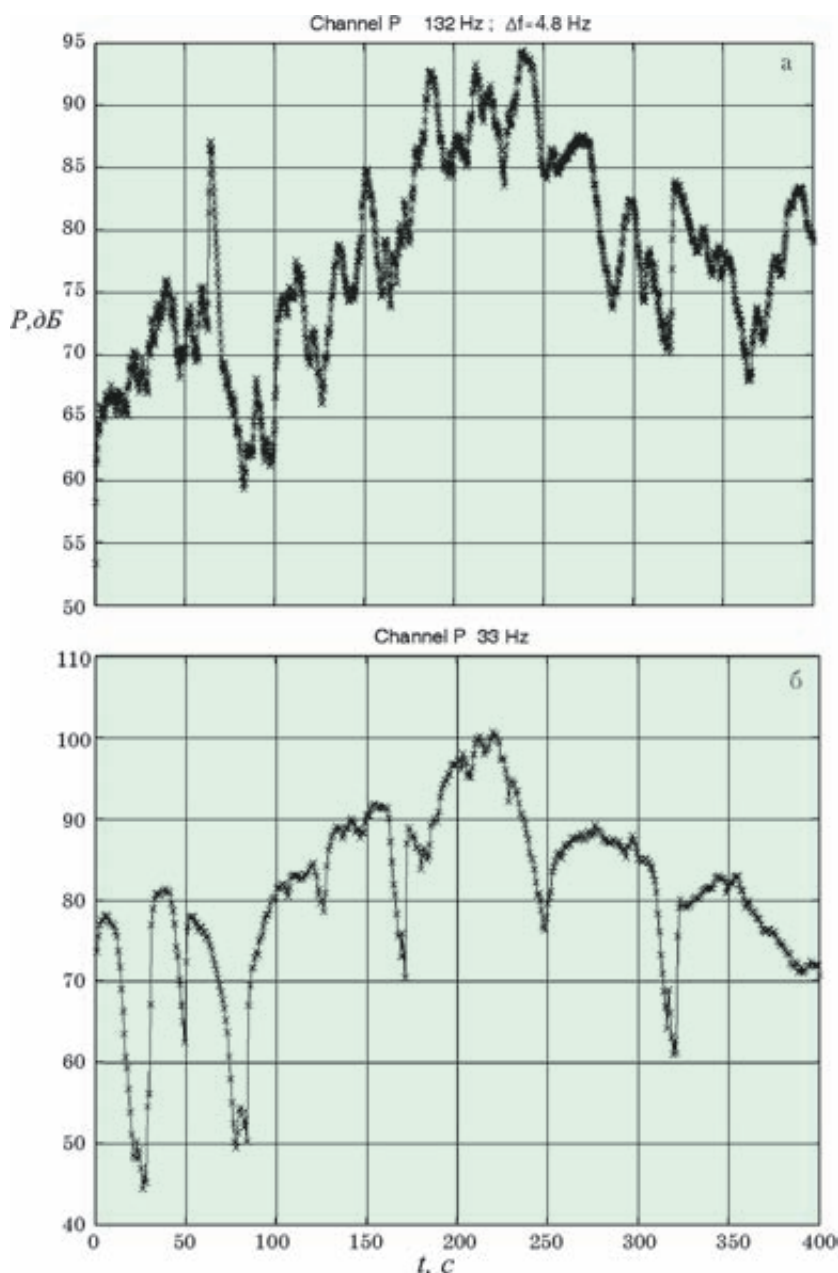


Рис. 10. Проходные характеристики для звукового давления на частотах 132 Гц (а) и 33 Гц (б), полученные в бухте Витязь

тает в реальной морской среде с реальными параметрами морского дна отличную от нуля составляющую, направленную в сторону морского дна. Судя по экспериментальным данным, приведенным на рис. 9, С, F и рис. 11, асимметрия угла падения увеличивается при понижении частоты (частотного параметра $k_1 h$) и уменьшении горизонта приема. При уменьшении частотного параметра возрастает роль нулевой моды и

утечки в грунт энергии именно этой моды, но с ростом частоты сами потери должны возрастать. Это положение подтверждается ростом асимметрии угла падения также и для частоты 132 Гц (рис. 11, а). Сам угол падения для вектора интенсивности уменьшился на частоте 33 Гц до $10 - 15^\circ$, это говорит о том, что вертикальная компонента вектора интенсивности в точках экстремума существенно больше (в 5–6 раз) горизонтальной.

В соответствии с численными оценками уровня самой вертикальной компоненты максимальные по амплитуде осцилляции вертикальной компоненты вектора интенсивности имеют место либо вблизи горизонта источника, либо вблизи морского дна, вблизи которого локализуются горизонты полного внутреннего отражения обобщенных нормальных волн высшего порядка, если таковые существуют в соответствии с условиями конкретного эксперимента. Особая структура звукового поля вблизи этих горизонтов подтверждается результатами компьютерного моделирования и наглядно поясняется рисунками 6, 7. Понятно, что наиболее интересен случай, когда источник звука и измерительная система располагаются вблизи морского дна, а само звуковое поле приобретает характер придонной волны с явно выраженными резонансными свойствами поля в полупространстве и в самом придонном слое. Ярким выражением резонансных свойств звукового поля в придонном слое является интерференционная (знакопеременная) структура вертикальной компоненты вектора интенсивности. Эта структура содержит мелкомасштабную составляющую, пространственный период которой равен половине длины волны, и крупномасштабную составляющую, пространственный период которой равен периоду интерференции двух обобщенных нормальных волн нулевого и первого порядка. Двухмасштабный период интерференции хорошо виден на рисунках 11, б, 12, б, которые соответствуют экспериментальным результатам, полученным в мелководной бухте Витязь.

Исследования векторной структуры звукового поля, и в первую очередь структуры вектора интенсивности, начатые в

работах [6, 7, 9–11], чрезвычайно важны для понимания энергетической структуры звукового поля как наиболее важной в практических приложениях. Сама энергетическая структура на импедансной границе раздела и в звуковом поле в целом оказалась принципиально различной в классической и обобщенной теориях. Для понимания этих различий уместно вспомнить о законе преломления вектора интенсивности на границе раздела двух сред, впервые сформулированном в работе [12], а затем в несколько более общем виде в работе [13]. Этот закон связывает угол падения вектора интенсивности ψ_1 на границу раздела и угол преломления ψ_2 соотношением

$$\rho_1 \operatorname{tg} \psi_1 = \rho_2 \operatorname{tg} \psi_2, \quad (1)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотность в верхней и нижней средах соответственно. Сам закон непосредственно следует из граничных условий непрерывности звукового поля по давлению и нормальной компоненте вектора колебательной скорости, из которых следует непрерывность поля по нормальной компоненте вектора интенсивности и непрерывность с весом касательной компоненты вектора интенсивности, причем роль весового коэффициента играет плотность среды.

В классической теории, построенной в самосопряженной модельной постановке, вертикальная компонента вектора интенсивности равна нулю при всех углах падения, а в соотношении (1) нужно положить

$$\psi_1 = \psi_2 = 90^\circ, \quad (I_{z1} = I_{z2} = 0, \quad \rho_1 I_{r1} = \rho_2 I_{r2}) \quad (2)$$

В энергетической структуре звукового поля в самом волноводе горизонтальная компонента вектора интенсивности остается доминирующей, а в дальней или волновой зоне она является единственной. Это

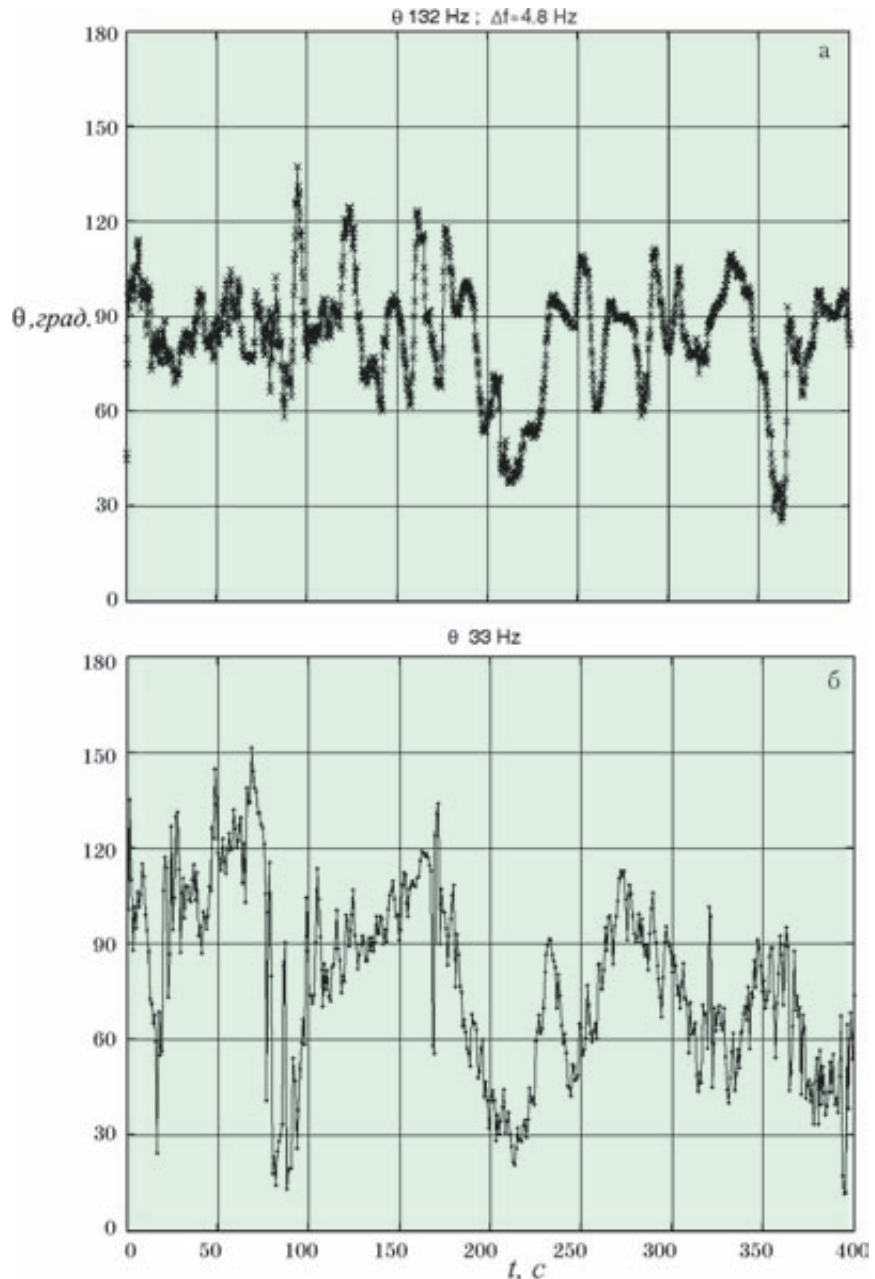


Рис. 11. Проходные характеристики для угла падения вектора интенсивности на частотах 132 ц (а) и 33 Гц (б), полученные в бухте Витязь

означает энергетическую независимость волновода и полупространства, что является характерной особенностью самосопряженной модельной постановки. Однако экспериментальные результаты, полученные в работах [9–11], не подтверждают соотношения (2) и классическую теорию соответственно.

В обобщенной теории, построенной в несамосопряжен-

ной модельной постановке, соотношение (1) выполняется в общем виде при углах падения, меньших критического, когда вертикальная компонента вектора интенсивности отлична от нуля, а горизонтальная компонента непрерывна с весом. Это соотношение определяет геометрию преломления линий потока энергии на границе раздела и энергетическую структуру поля в самом волноводе и по-

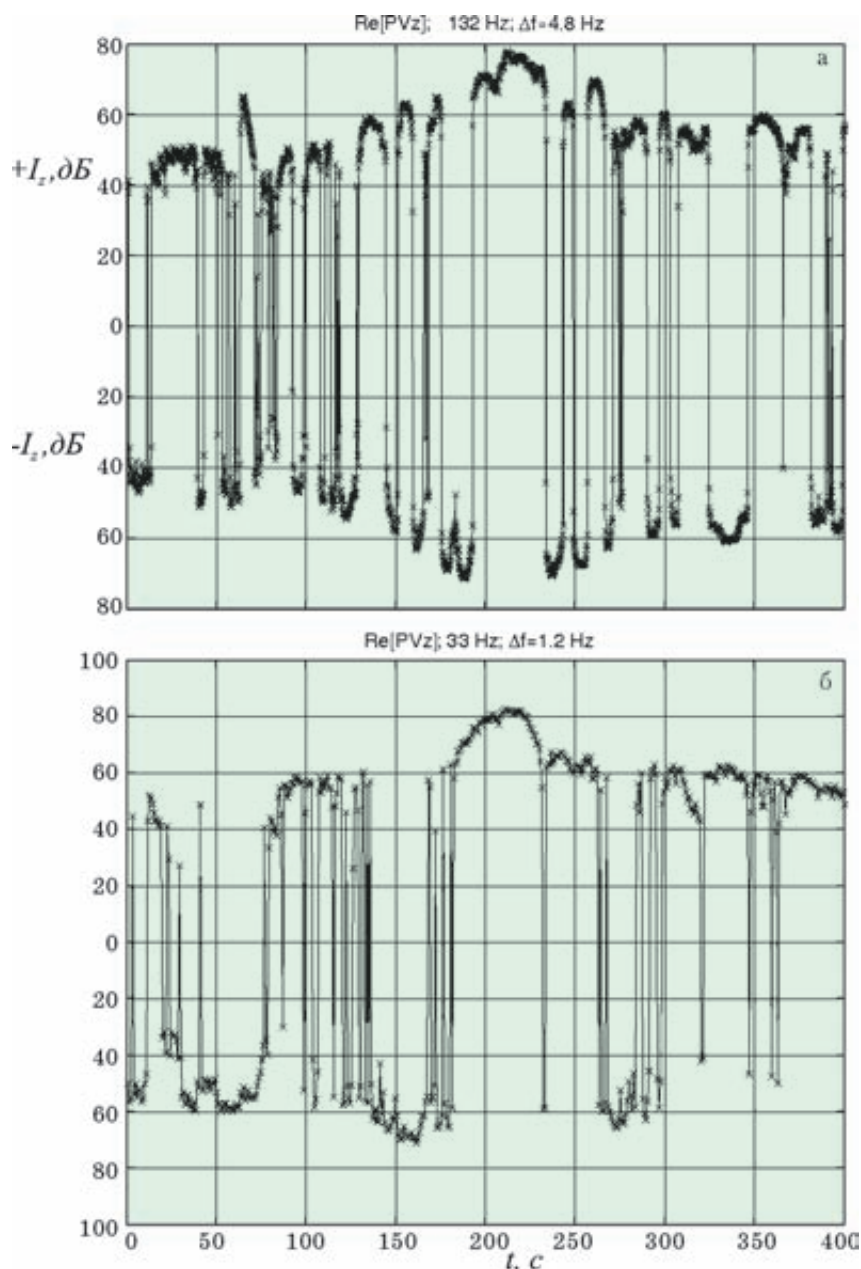


Рис. 12. Проходные характеристики для вертикальной компоненты вектора интенсивности $\pm I_z$ на частотах 132 Гц (а) и 33 Гц (б), полученные в бухте Витязь

лупространстве как в энергетически связанных подсистемах открытой системы волновод-полупространство. При углах падения, больших критического, горизонтальная компонента вектора интенсивности равна нулю на границе раздела. Это условие обеспечивается генерацией вихревой составляющей вектора интенсивности, как это пояснялось выше рис. 1, б, и формированием горизонта полного внутреннего отражения.

При этом вертикальная компонента вектора интенсивности отлична от нуля в локальном смысле, но равна нулю в среднем, а в соотношении (1) нужно положить

$$\begin{aligned} \psi_1 = \psi_2 = 0, (I_{z1} = I_{z2} \neq 0, \\ \langle I_z \rangle = 0, I_{r1} = I_{r2} = 0). \end{aligned} \quad (3)$$

В энергетической структуре звукового поля в самом волноводе в дальней зоне обе компоненты вектора интенсивности соизмеримы, а с понижением

частоты (частотного параметра) преобладает вихревая составляющая вектора интенсивности, подчеркивающая резонансный характер самого звукового поля.

Все результаты экспериментальных работ [9–11] подтверждают именно обобщенную теорию, выполнимость общих соотношений (1) только в ближней зоне при углах падения, меньших критического, и предельных соотношений (3) в дальней (волновой) зоне источника звука, где проводились экспериментальные работы. Особенно важно подчеркнуть, что работы в бухте Витязь проводились с донным комбинированным приемником, который зафиксировал вертикальную компоненту вектора интенсивности непосредственно у дна в полном соответствии с соотношениями (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в настоящей работе в рамках обобщенной теории компьютерный анализ векторной структуры звуковых полей в волноводе Пекериса нашел подтверждение в работах [9–11], посвященных экспериментальному исследованию поля вектора интенсивности. Как показали экспериментальные исследования, его вертикальная компонента принципиально отлична от нуля и имеет весьма специфическую периодическую зависимость от продольной координаты. Эта особенность, в свою очередь, порождает весьма специфический знакопеременный характер вихревой составляющей вектора интенсивности. Поскольку классическая теория принципиально отвергает существование вертикальных потоков мощности в поле нормальных волн, то фактически настоящая работа продолжает начатый работами [1–3] сопоставительный анализ

классической и обобщенной теорий, анализ их пригодности для объяснения экспериментальных результатов аномального плана и их способности предсказывать новые физические явления. К числу таких новых явлений, безусловно, относится и открытие в работах [9–11] самого факта существования вертикальных знакопеременных потоков мощности в мелком море, которые являются наглядным подтверждением резонансных свойств самого звукового поля, возбуждаемого в открытом волноводе типа волновода Пекериса. Как и любое резонансное явление, сам факт существования значительных по величине знакопеременных вертикальных потоков мощности и знакопеременных вихревых структур в звуковом поле существенно меняет наши представления о самой природе возникновения волноводного распространения и роли резонансных явлений в открытых волноводных системах. К числу таких систем относится и, казалось бы, простейший из них – волновод Пекериса, но полученные в этой работе результаты, как теоретические, так и экспериментальные, имеют весьма общий характер и применимы к открытым слоистым волноводам любой степени сложности, которые играют ключевую роль в акустике океана.

Применение комбинированных приемников на борту автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) многоцелевого назначения позволяет весьма эффективно решать задачи обнаружения источников подводного звука, например китов и китообразных, сопровождения источника и определения его координат. Наиболее перспективными для этих целей оказываются описанные выше новые характеристики векторных звуковых полей и их уникальные особенности, связанные

с резонансным характером возбуждения неоднородных волн обобщенного типа. При этом сам АНПА с комбинированным приемником на борту играет роль мобильной измерительной приемной системы, работающей в режиме «тишины», положение которой по отношению к источнику звука может быть легко оптимизировано выбором соответствующего горизонта позиционирования. Кроме того, использование комбинированных приемников в составе гидроакустической навигационной системы, входящей в систему позиционирования АНПА, позволит существенно увеличить ее дальность действия и уменьшить погрешность определения координат АНПА, если в качестве измерительного канала использовать вертикальный канал комбинированного приемника, а в качестве информационного параметра использовать вертикальную компоненту вектора интенсивности. Преимущества гидроакустической навигационной системы, в составе которой используются комбинированные приемники, существенно возрастают, когда сам АНПА и комбинированные приемники работают вблизи морского дна, т.к. при этом существенно возрастает роль обобщенной придонной волны (ОПВ) и ее вклад в энергетику суммарного звукового поля. Сама роль ОПВ при разработке гидроакустических навигационных систем дальнего радиуса действия обсуждалась нами в работах [2, 3] с подробным анализом оптимальных условий ее возбуждения и приема, а также методов ее идентификации в натурном эксперименте. Новые особенности пограничного волнового движения, связанные с обнаружением обобщенной придонной волны и обусловленных ею вихревых структур, открывают и новые возможности его практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные свойства звуковых полей вблизи морского дна. Часть 1 // Подводные исследования и робототехника. 2010. №1(9). С. 4–13.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные свойства звуковых полей вблизи морского дна. Часть 2 // Подводные исследования и робототехника. 2010. №2(10). С. 4–16.
3. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные свойства звуковых полей вблизи морского дна. Часть 3 // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 4–16.
4. Касаткин Б. А., Злобина Н.В. Несамосопряженная модельная постановка граничной задачи Пекериса // ДАН. 2010. Т. 434, № 4. С. 540–543.
5. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М.: Наука, 2009. 496 с.
6. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
7. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
8. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Захаров Л.Н., Ильичев В.И. Особенности распространения в мелкой воде сигналов, возбуждаемых источником, расположенным в воздухе // ДАН. 1993. Т. 333, № 4. С. 503–506.
9. Щуров В.А., Кулешов В.П., Ткаченко Е.С. Фазовые спектры интерференции широкополосного поверхностного источника в мелком море // Сборник трудов XXII сессии РАО. Т. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 248–251.
10. Щуров В.А., Кулешов В.П., Ткаченко Е.С. Вихри акустической интенсивности в мелком море // Техническая акустика. 2010. № 12.
11. Щуров В.А. Сравнение завихренности вектора акустической интенсивности в мелком море на частотах 23 Гц и 110 Гц // Сборник трудов XXIV сессии РАО. Т. 2. М.: ГЕОС, 2011. С. 277–280.
12. Chapman D.M. Using streamlines to visualize acoustic energy flow across boundaries // J. Acoust. Soc. Am. 2008. Vol. 124. P. 48–56.
13. Годин О.А. Линии тока акустической энергии и их преломление на границах раздела // Доклады XII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2009. С. 145–148.