

МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПРИВЕДЕННОЙ ШУМНОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ МОНОПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2021 г. Г. М. Глебова^а, Г. Н. Кузнецов^б, *

^аЮжный федеральный университет, ул. Большая Садовая 105/42, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

^бИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

*e-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

Показана возможность оценки приведенных к свободному пространству значений звукового давления, создаваемых буксируемыми тональными излучателями при приеме сигналов вертикально-горизонтальной скалярной антенной, установленной в мелком море. При буксировке излучателя выполнено взаимное позиционирование источника сигналов и элементов приемной антенны, построена геометрия антенны. Для расчета передаточных функций волновода используется геоакустическая модель дна мелкого моря, полученная в результате предварительно выполненной акустической калибровки волновода в районе проведения эксперимента. Анализируется влияние достоверности априорной информации об условиях эксперимента на погрешность оценки пересчитанных к свободному пространству значений звукового давления.

Ключевые слова: мелкое море, монополь, скалярная антенна, передаточные функции волновода, взаимное позиционирование, пересчет в точку излучения

DOI: 10.31857/S0320791921030035

ВВЕДЕНИЕ

Важность решения проблемы измерения в морских условиях физических полей различного типа, прежде всего оценки гидроакустических характеристик морских объектов, подтверждается тем, что созданием и развитием средств контроля и измерения шумности и отражательной способности движущихся надводных и подводных платформ и подводных аппаратов различного назначения занимаются специалисты всех ведущих государств [1–4]. Опубликованы документы, определяющие стандарты методик для проведения анализа и представления результатов измерения подводного шума судов. Научные публикации последних десятилетий как зарубежных, так и отечественных авторов, отражают многогранность и сложность подхода к решению данной проблемы. В частности, исследования посвящаются снижению шумов коммерческих и вспомогательных судов [4–6]. Эта задача является актуальной в связи с необходимостью обеспечения акватории, а также повышенными требованиями к экологической безопасности экипажа и пассажиров (известно, что внешние шумы судна и внутренние шумы создаются одними и теми же источниками, в частности, вибрациями корпуса). Отмечается также необходимость контроля и снижения шумности обеспечиваю-

щих судов для выполнения требований по экологии и безопасности жизнедеятельности морских животных, в частности серых китов [7]. Из публикаций следует, что благодаря усилиям специалистов достигнуты большие успехи, например, шумность морских объектов уменьшилась за последние десятилетия на порядок. Тем не менее, несмотря на несомненные достижения, имеются важные не решенные проблемы измерения гидроакустических характеристик морских, прежде всего, подводных объектов, требующие разработки новых подходов к решению поставленных задач [8]. Имеются проблемы с пересчетом принятых гидрофонами или антеннами звуковых давлений (ЗД) в зону излучения (для малогабаритных источников – в точку) с одновременным учетом расстояния до источника, передаточной функции волновода и направленности излучения. Для расчета передаточной функции волновода и ее учета при анализе широкополосных корабельных шумов разрабатывают различные модели, в частности, основанные на построении функций Грина широкополосных сигналов [9]. Немногочисленные удачные решения этой задачи являются скорее исключением, чем правилом [10]. Для крупногабаритных объектов эта задача дополнительно усложняется в связи с неопределенностью координат фазового центра, к которому желательно

пересчитывать измеренные значения акустического давления, приведенные к свободному пространству. Отсутствие информации о координатах фазового центра излучения усложняет «позиционирование» морского объекта относительно приемной системы. Для решения этой задачи применяются специальные излучающие средства — «пингеры» [3]. Далее в статье при анализе экспериментальных данных оценка расстояния до буксируемого низкочастотного источника выполняется с использованием аналогичных технических средств (пингеров) и принципов обработки.

Ниже предпринимается попытка решить задачу пересчета ЗД из точек приема в точку излучения с учетом основных перечисленных влияющих факторов. Учитывается также и движение (буксировка) излучающего комплекса относительно пространственно-развитой приемной антенны. Такая процедура в литературе называется «оценка приведенной к стандартным условиям шумности» [1, 4, 8, 9, 11].

На основе анализа результатов обработки экспериментальных данных и компьютерного моделирования в статье делается вывод о принципиальной возможности оценки приведенной шумности источников в заданной постановке.

Работа выполнена с использованием специализированной аппаратно-методической базы [12], обеспечивающей предварительное решение целого ряда взаимосвязанных вспомогательных задач:

- абсолютная калибровка излучателей [13] и измерительной многоканальной приемной аппаратуры,

- акустическая калибровка района работ и построение адекватных частотно-зависимых передаточных функций волновода (ПФВ) [14–17],

- предварительное измерение геометрии пространственно развитой приемной антенны и высокоточное позиционирование источника относительно приемников [18],

- выполнение измерений с использованием системы единого времени, эхолота, измерителей вертикального профиля скорости звука и т.д.

Отметим, что акустическая калибровка позволяет при построении модели ПФВ учитывать не только параметры модели грунта, но и реальные глубины постановки приемной системы и источника. Это позволило сравнить результаты пересчета с данными предварительной градуировки излучателей в относительно глубоком море [11, 14].

Выполнено также компьютерное моделирование для оценки влияния на погрешность пересчета различного рода помех, прежде всего аддитивных. Кроме того, проанализированы вероятные методические ошибки, связанные с погрешностями акустической калибровки волновода или взаимного позиционирования. Отметим, что отдельное влияние каждого вида помех и методиче-

ских погрешностей оценить достаточно сложно как аналитически, так и экспериментально, поскольку они влияют, как правило, совместно. По этой причине в статье приводятся результаты компьютерного моделирования, которые позволяют отдельно оценить влияние разного вида факторов на погрешность оценки излучаемого ЗД при использовании различных алгоритмов. Параметры моделирования задавались по возможности совпадающими с условиями экспериментов, что позволило сравнить результаты моделирования и обработки экспериментальных данных. На этой основе сделаны конкретные выводы о влиянии каждого вида факторов на точность пересчета ЗД.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценки приведенной к расстоянию 1 м шумности источника сигналов был выбран район работ со сравнительно ровным дном и постоянной глубиной. Применялась инструментально-алгоритмическая база на основе пространственно-развитой приемной антенной, геометрия которой была измерена экспериментально после морской постановки. При решении основной задачи использовались результаты абсолютной калибровки приемных и излучающих средств, характеристики ПФВ в широкой полосе частот, система единого времени и алгоритмы, обеспечивающие непрерывное взаимное позиционирование буксируемого излучающего комплекса относительно каждого приемного элемента антенны.

Отметим, что взаимное позиционирование и акустическая калибровка приемных антенн, а также волновода с целью построения ПФВ, представляют собой достаточно сложные самостоятельные задачи. Методики, технические средства для их решения и детальное изложение результатов исследований, выполненных в том же районе, представлены в [11–18]. Поэтому в настоящей работе по этим вопросам используются только итоговые результаты и основные выводы. Основное внимание уделяется методам и результатам оценки приведенной шумности.

2.1. Приемная антенна

Эксперименты проходились в мелком море с использованием скалярной антенны, имеющей вертикальные и горизонтальные участки, длина которых равна 15 и 100 м. Четыре приемника были установлены на вертикальном участке, 12 приемников располагались на донном горизонтальном участке антенны. Конструктивная схема расположения вертикальной и горизонтальной ветвей антенны представлена на рис. 1. Размеры антенн обозначены в метрах на вертикальной (z) и горизонтальной (x) осях.

На рис. 2 представлены цельнозалитые гибкие (эластичные) антенны, аналогичные устанавли-

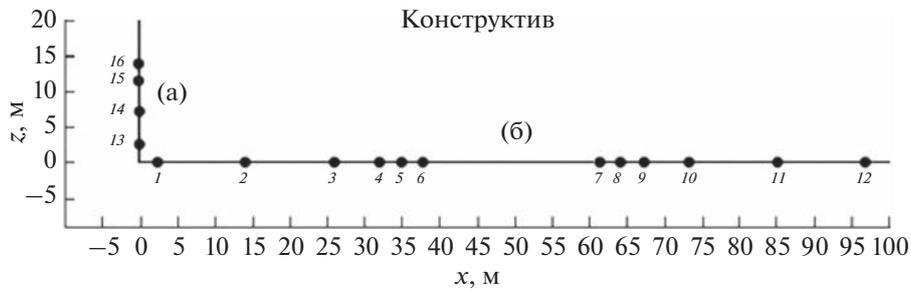


Рис. 1. Заданная геометрия (схема) скалярной приемной антенны. (а) — Приемники 13–16 должны располагаться на вертикали, (б) — приемники 1–12 на донном горизонтальном линейном участке.

ваемым в районе работ (из двух таких антенн путем электрического и механического соединения образовалась длинная 100 м антенна). В качестве приемных элементов использовались цилиндрические гидрофоны, вблизи которых были расположены предварительные усилители. Вдоль антенн проложен кевларовый трос, соединяющий механически все элементы. Вдоль троса располагались витые пары, по которым сигналы от гидрофонов и предварительных усилителей поступали в аппаратный контейнер, расположенный в зоне соединения горизонтального и вертикального участков антенн. Из аппаратного донного контейнера сигналы уже в цифровой форме передавались на приемное научное судно по одножильному кабель-тросу длиной 400 м и вводились в компьютер. Все приемные элементы антенны перед морской постановкой проходили абсолютную калибровку в заглушенном гидроакустическом бассейне (частоты 500–10000 Гц) и в малой измерительной камере (частоты ниже 300 Гц). Установлено, что в диапазоне частот от 30 Гц до 7 кГц чувствительности приемных каналов с гидрофонами слабо зависят от частоты (неравномерность не более 1.5 дБ). На частотах от 7 до 10 кГц наблюдается спад чувствительности на 2–3 дБ. Разброс чувствительности различных приемников не превышал ± 0.75 дБ.

Значения абсолютных чувствительностей приемных каналов, включая усилительные тракты, используются далее при оценке величины приведенного к стандартным условиям ЗД. Глубины места в районе морского эксперимента измерены эхолотом и изменялись на расстояниях до 1–1.5 км в пределах 52–53.5 м. Глубина буксировки излучателя устанавливалась в пределах от 5 до 30 м, выдерживалась постоянной и контролировалась датчиком статического давления. Буксировался излучающий комплекс (рис. 3), на каркасе которого были компактно размещены три низкочастотных узкополосных излучателя электромагнитного типа с резонансными частотами 117, 320 и 680 Гц и высокочастотный пьезокерамический широкополосный излучатель (пингер) с рабочим диапазоном частот 2500–5000 Гц, который ис-

пользовался для решения задачи взаимного позиционирования.

2.2. Взаимное позиционирование

Методика позиционирования антенны и излучателя относительно антенны подробно изложена в [18]. По этой методике в системе единого времени осуществлялся компьютерный запуск импульсных сигналов от пьезокерамического излучателя (пингера) и запись сигналов, принятых гидрофонами антенны. Координаты излучателя определялись с использованием GPS. Типичные зависимости относительных координат буксируемого излучающего комплекса, измеренные относительно апертуры антенны, приведены на рис. 4. На рис. 4а приведена фотография с экрана монитора компьютера.

При морской постановке антенна вместе с кабель-тросом с большим усилием “вытягивалась” кораблем-постановщиком вдоль донной поверхности, поэтому геометрия горизонтального участка антенны с высокой точностью соответ-



Рис. 2. Цельнозалитые скалярные антенны. Слева — эквидистантная антенна, справа — не эквидистантная. Обе антенны являются эластичными, многоканальными и имеют длину по 50 м.



Рис. 3. Излучающий комплекс перед спуском на воду. В центре расположены бак противодавления и контейнер с компьютером и часами. Излучатели 1, 2 и 3 соответствуют частотам 117, 320 и 680 Гц. Пинг-пер закреплен вблизи штанги.

ствовала прямой линии (рис. 4, 5). Это подтверждается результатами экспериментальной оценки геометрии горизонтального участка антенны и взаимного позиционирования гидрофонов относительно буксируемого излучающего комплекса по акустическим сигналам (рис. 5).

Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что измеренные экспериментально координаты гидрофонов хорошо согласуются с конструктивными размерами антенны. Некоторые отклонения приемников 13–16 связаны с наличием интенсивных подводных течений в районе проведения работ.

2.3. Сравнение экспериментальных и расчетных интерференционных зависимостей звукового давления

Для построения акустической модели грунта и основанной на ней модели передаточной функции была выполнена акустическая калибровка волновода. Это позволило в режиме буксировки с

учетом ПФВ и взаимного позиционирования рассчитать теоретические зависимости ЗД (P^2) от расстояния между источником сигналов и каждым приемным элементом антенны. На рис. 6 изображены экспериментально измеренные зависимости (\hat{P}^2) от расстояния между гидрофоном и излучателем для траектории буксировки, изображенной на рис. 4 (кривая 3). Для этих же гидрофонов методом нормальных волн, с учетом данных взаимного позиционирования и оценки параметров грунта, рассчитаны теоретические зависимости ЗД. При обработке экспериментальных и теоретических данных результаты приводятся для значений ЗД, нормированных на максимальное значение ЗД на антенне. Результаты расчета (пунктирные кривые) и экспериментально измеренных кривых прохода (сплошные линии) сравниваются на рис. 6. Видно, что на низких частотах 117 и 320 Гц наблюдается интенсивная интерференция, без учета которой решать задачу оценки приведенной шумности не имеет смысла. Отметим, что в эксперименте буксировка излучателя производилась с постоянной скоростью, равной 1.7 м/с.

Степень совпадения теоретически рассчитанной и экспериментальной кривых прохода характеризует эффективность алгоритма построения адекватной модели волновода и взаимного позиционирования. Количественно степень совпадения этих кривых можно оценить, используя среднеквадратическую ошибку, которая рассчитывается следующим образом [19, 20]:

$$\sigma_i(P^2) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{\hat{S}_{i,k} - S_{i,k}}{S_{i,k}} \right)^2} \times 100\%, \quad k = 1, \dots, K,$$

где $\hat{S}_{i,k}$ и $S_{i,k}$ – измеренные и теоретически рассчитанные значения мощности сигнала на i -м приемном элементе антенны в k -й точке траектории, K – число точек, используемых на кривой прохода при обработке сигнала.

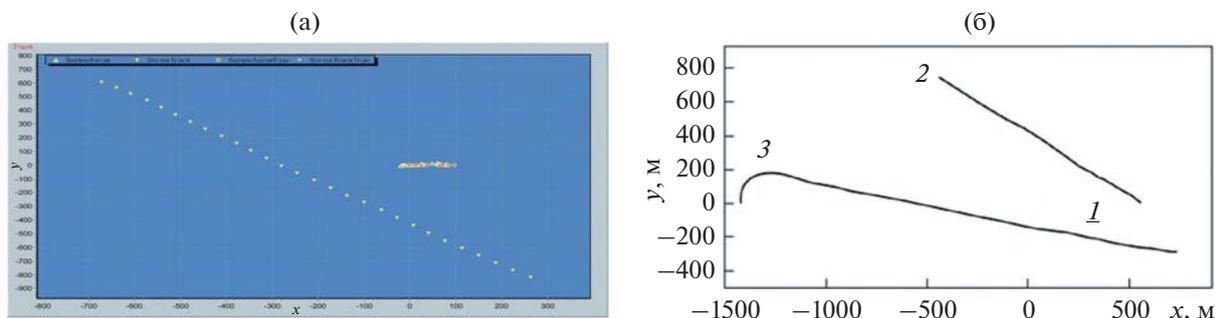


Рис. 4. Расположение буксируемого излучателя и приемной антенны: (а) – точками обозначены оценки координат излучателя на линейном участке длиной более 700 м и координаты приемников антенны с апертурой 100 м; (б) – приемная антенна 1 и две траектории буксировки излучателя на протяженных трассах 2 и 3.

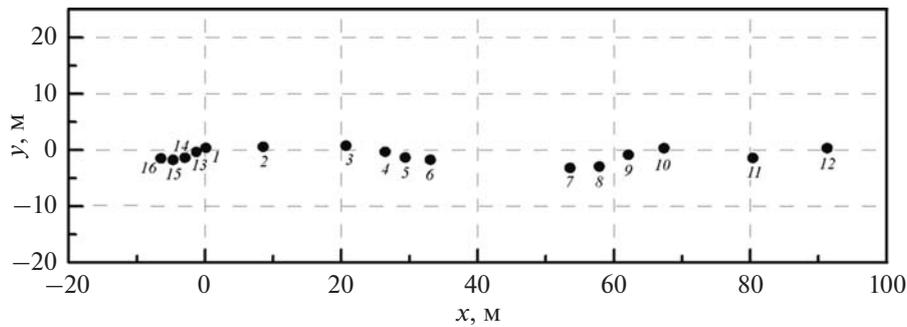


Рис. 5. Усредненные значения координат приемных элементов антенны, полученные в результате взаимного позиционирования сигналов по трем галсам.

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых прохода показало, что согласие результатов наблюдается по 1–15-му приемным элементам (кроме 16-го) в достаточно большом диапазоне расстояний ±(500–800) м от траверза и более, а среднеквадратические ошибки $\sigma_i(P^2)$ принимают значения не более 15–25%.

3. ОЦЕНКА ПРИВЕДЕННОЙ ШУМНОСТИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Алгоритмы оценки приведенной шумности

Как показано выше (см. рис. 6), учет интерференции и корректная оценка приведенной шумности источника возможна только при выполнении согласованной фильтрации – согласованной с геометрией антенны и траекторией движения, с моделью передаточной функции волновода и параметрами модели излучающего источника.

При обработке экспериментальных данных временные сигналы, поступающие на вход приемных элементов антенны, пропускаются через узкополосные фильтры с центральными частотами ω и шириной полосы $\Delta\omega/2\pi < c/L$, где L – апертура приемной антенны, c – скорость звука. Если интервал между соседними временными отсчетами на выходе фильтров не менее чем $2\pi/\Delta\omega$, то эти отсчеты считаются независимыми по времени. Обычно в качестве узкополосного фильтра используется Фурье-преобразование, что соответствует комплексному представлению сигналов в спектральной области. В дальнейшем для простоты записи зависимость от частоты опущена.

В одном из возможных вариантов решения данной задачи применяются алгоритмы, основанные на использовании системы уравнений, в которой приравниваются с одной стороны – экспериментально измеренные величины ЗД, а с другой стороны – соответствующие им теоретические значения, зависящие от условий проведения эксперимента [21]. Применительно к измерению приведенной мощности источника монополюсного типа с использованием приемной

антенны, состоящей из M элементов, алгоритм можно представить в виде:

$$\hat{P}_{\tau m}^2 = P_0^2 \varphi_{\tau m} \varphi_{\tau m}^*, \quad \tau = 1, \dots, T, \quad m = 1, \dots, M$$

или в векторной форме

$$\hat{P}^2 = P_0^2 \varphi \varphi^*. \quad (1)$$

Здесь $\varphi_{\tau m} = -j\omega r \Phi_{\tau}(r, r_m)$, $\Phi(r, r_m)$ – потенциал скоростей для источника излучения единичной мощности в точке с координатами r и приемного элемента антенны, находящегося в точке с координатами r_m . При движении источника общее время наблюдения разбивается на T временных интервалов, внутри каждого из которых процесс признается квазистационарным, τ – порядковый номер временного интервала наблюдения.

Экспериментально измеренный вектор наблюдений \hat{P}^2 представляет собой сумму сигналов от источника излучения и помех $\hat{P} = s + n$. Если время наблюдения в каждой точке $\tau = 1, \dots, T$ не позволяет выполнить усреднение, то помеха в измеренных величинах (1) содержит не только аддитивную, но и мультипликативную составляющую, так как $\hat{P}^2 = s^2 + 2sn + n^2$. Однако, если скорость движения источника такова, что на временном интервале τ процесс квазистационарен и можно выполнить усреднение по $\mu = \tau / \Delta t$ реализациям (где Δt – длительность временного отрезка, используемого для Фурье преобразования), то имеется возможность перейти к алгоритму

$$\hat{P}^2 = \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{\mu} P_0^2 \varphi_m \varphi_m^*. \quad (2)$$

В данном методе можно выполнить усреднение по нескольким соседним реализациям Фурье-преобразования. Число усреднений выбирается небольшим (от трех до семи) – таким, чтобы крупномасштабная интерференционная структура сигналов сохранялась, а случайные мелкомасштабные флуктуации измеряемых величин сгладились. При этом уменьшается как доля мульти-

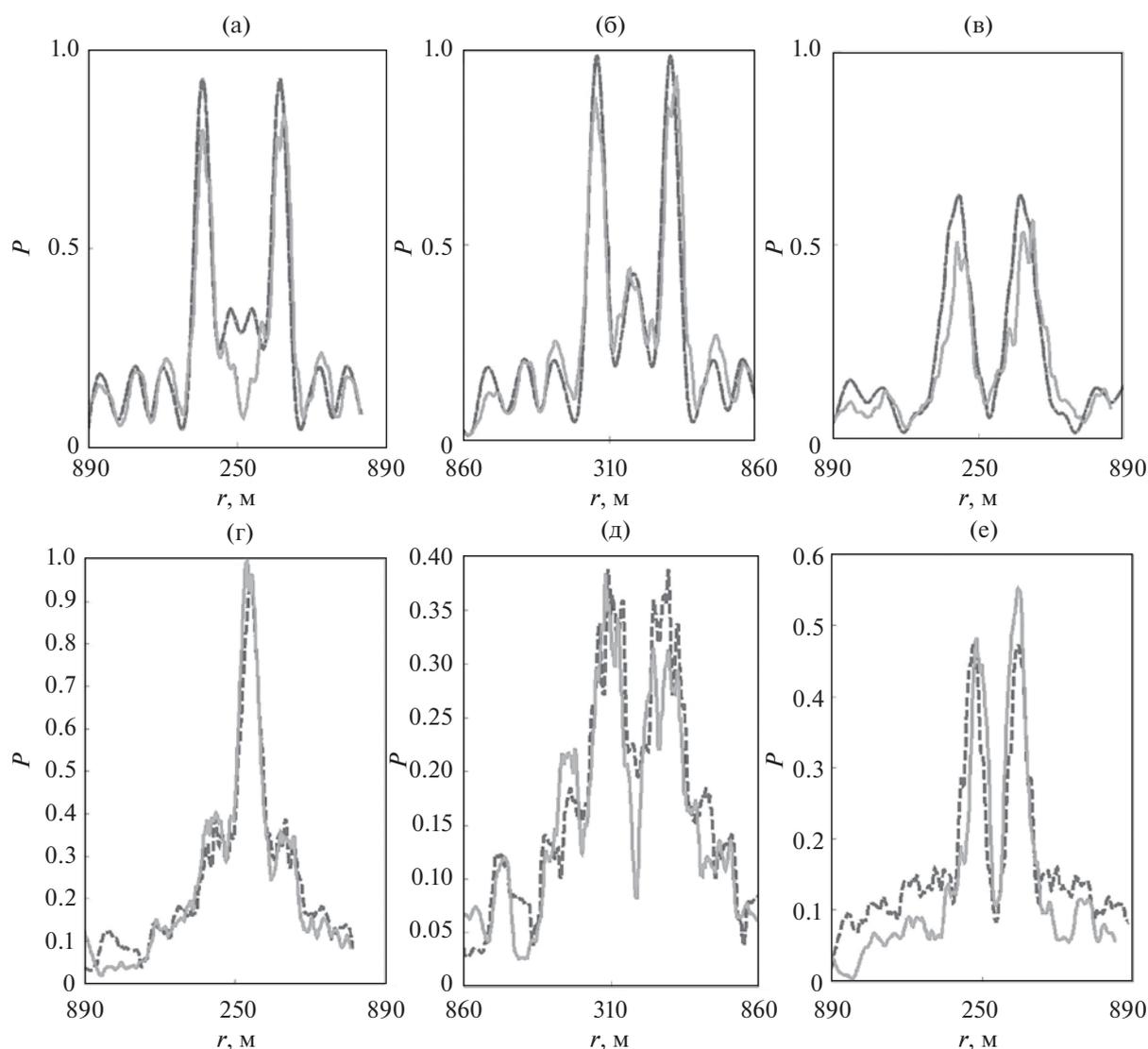


Рис. 6. Зависимости ЗД от расстояния между гидрофоном и излучателем для (а, г) – первого, (б, д) – двенадцатого и (в, е) – тринадцатого приемных элементов антенны. Частоты (а–в) – 117 и (г–е) – 320 Гц. Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – теория.

пликативной составляющей ($2sn$), так и доля аддитивной составляющей (n^2). Метод расчета (2) назовем *P-slide*.

Для наглядности и иллюстрации того, что алгоритмы оценки приведенной шумности (1) и (2) фактически являются алгоритмами согласованной фильтрации, рассматривается также алгоритм, в котором пространственная интерференция сигнала не учитывается (метод расчета обозначим *R*)

$$\hat{P}^2 = P_0^2 F(r), \quad (3)$$

здесь $F(r)$ – функция расстояния между источником и приемными элементами антенны. В зависимости от соотношения между глубиной волновода и расстоянием до источника, а также длиной

звуковой волны сигнала ее выбирают в виде $1/r_1$ (цилиндрический закон распространения) или $1/r_1^2$ (сферический закон распространения).

Системы уравнений (1)–(3) при большом числе временных реализаций и приемников являются статистически переопределенными и решаются методом наименьших квадратов для каждой спектральной составляющей комплексного спектра, полученного после Фурье-преобразования входных сигналов. Далее рассматриваются три метода (1)–(3) оценки ЗД, которые в общем виде можно представить как $\hat{P}^2 = P_0^2 A$. Обозначим их как “*P*”, “*P-slide*” и “*R*”, соответственно. Ковариационную матрицу ошибок оценок ЗД можно рассчитать методом Монте-Карло, а для пере-

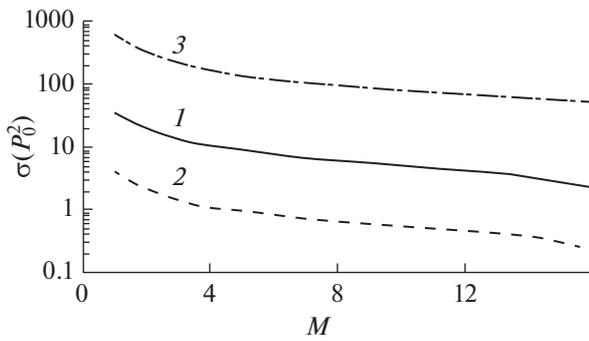


Рис. 7. Зависимость среднеквадратической ошибки оценки приведенной шумности от числа приемных элементов в антенне, отношение $S/N = 1$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют методам P , P -slide и R .

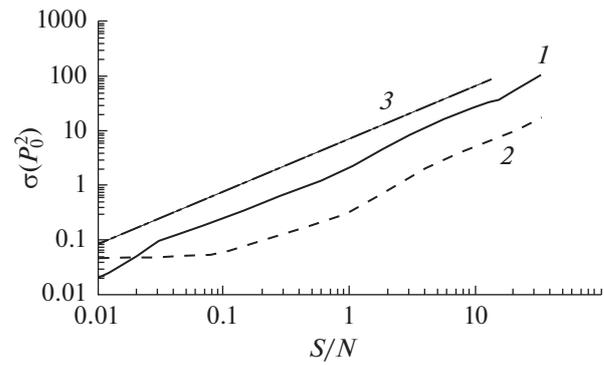


Рис. 8. Зависимость среднеквадратической ошибки оценки приведенной шумности от отношения помеха/сигнал; $M = 16$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют методам P , P -slide и R .

определенной линейной системы уравнений, которая решается методом наименьших квадратов, можно использовать выражение [20]

$$D(P_0^2) = P_n^2 (AWA^*)^{-1}. \quad (4)$$

Здесь W — ковариационная матрица помехи, которая в нашем случае представляет собой единичную матрицу, P_n^2 — мощность помехи.

3.2. Анализ алгоритмов оценивания приведенной шумности

Влияние помех и методических погрешностей достаточно сложно оценить как аналитически, так и на основе анализа экспериментальных данных. По этой причине далее приводятся результаты компьютерного моделирования, которые при использовании различных алгоритмов позволяют явно показать независимое воздействие разного вида факторов на погрешность оценки ЗД. Моделирование алгоритмов оценки приведенной шумности P , P -slide, R и анализ их статистических характеристик выполнялся для приемной антенны и канала распространения, которые соответствуют условиям проведения экспериментальных работ. Скалярная приемная антенна, состоящая из 16 приемных элементов, была установлена в волноводе глубиной 53 м (см. рис. 1). Скорость буксировки излучателя равнялась 1.7 м/с. Передаточная функция волновода рассчитывалась по модели нормальных волн для параметров грунта, определенных в исследуемом районе [14–17]. Скорость звука в воде была равна 1468 м/с, в жидком полупространстве — 1607 м/с, отношение плотности грунта к плотности воды — 1.5. Длина горизонтальной апертуры антенны 100 м.

При моделировании значение ЗД задавалось равным единице. При обработке экспериментальных данных результаты приводятся для значений ЗД, нормированных на максимальное значение ЗД, которое получено по методу P -slide.

Моделирование проводится для источника, движущегося на глубине 27 м по траектории 3 (см. рис. 4). При этом координаты источника в горизонтальной плоскости изменяются по оси x от -600 до 200 м, а по оси y от -65 до 340 м.

Для того чтобы выполнить моделирование в зависимости от отношения сигнал/помеха на входе приемной антенны, рассчитывается среднее значение мощности сигнала (S), измеренное на всех приемных элементах антенны при движении источника по заданной траектории. А мощность шума N задается такой, чтобы в момент прохода траверза выполнялось заданное отношение сигнал/помеха (S/N). Зависимость среднеквадратической ошибки оценки приведенной шумности от числа приемных элементов антенны M , по которым производится расчет ЗД, и в зависимости от отношения сигнал/помеха представлены на рис. 7 и 8, соответственно. При моделировании предполагалось, что априорная информация о параметрах волновода, координатах источника и приемной антенны достоверна.

Анализ представленных результатов моделирования показывает, что при увеличении числа приемников от 1 до 16 среднеквадратическая ошибка оценки ЗД уменьшается более чем в 10 раз (см. рис. 7). Видно также, что удовлетворительная оценка дисперсии ЗД может быть получена при отношении N/S не более чем 10–12, когда $\sigma(P_0^2) \leq P_0^2$, но при использовании всех элементов приемной антенны. Метод P -slide дает лучший результат, поскольку скользящее усреднение позволяет уменьшить не только аддитивную, но и мультипликативную составляющую помех, которая неизбежно присутствует в измеряемых данных при небольшом числе усреднений Фурье-компонент.

Обработка экспериментальных данных на частоте 117 и 320 Гц также показала преимущество алгоритма P -slide. Средние значения оценки приведенной величины ЗД хорошо согласуются с ре-

Таблица 1. Оценки средних значений и математического ожидания приведенного к стандартным условиям звукового давления, измеренные 3-мя способами

Метод	P	P -slide	R
$\sigma(P_0^2)$	0.75	0.14	7.86
P_0^2	0.98	1.00	5.76

результатами предварительной градуировки в условиях относительно глубокого моря одиночных излучателей, входящих в буксируемый комплекс [13], и результатами расчета приведенных значений ЗД излучателей, измеренных в этом же районе с использованием вертикальной антенны [11, 14]. Величины смещений, полученные в настоящей работе для частот 117 и 320 Гц, отличаются от значений, измеренных при калибровке излучателей в стационарных условиях, не более чем на 15–20%, а от средних значений, вычисленных при буксировке излучателя и приеме сигналов на вертикальную антенну, – не более чем на 25–35%.

Теоретические и экспериментальные значения плотности вероятности ЗД, рассчитанные при использовании различных методов обработки, сравниваются на рис. 9. По единственному галсу, выполненному при проведении эксперимента, рассчитать статистические характеристики решения уравнений (1)–(3) методом наимень-

ших квадратов не представляется возможным (получается одно значение ЗД). Поэтому расчет ЗД выполнялся при использовании каждого из уравнений систем (1)–(3), затем рассчитывались средние значения и дисперсия оценки ЗД, которые приведены в табл. 1. Теоретическая плотность вероятности распределения оценки ЗД рассчитывалась для гамма-распределения [19, 20]

$$\Phi(x|\alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} & \text{при } x > 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

с искомыми параметрами α и β . По найденным из экспериментальных данных средним значениям и дисперсиям оценки \hat{P}^2 вычислены параметры распределений $\alpha = \hat{P}^2 / \sigma^2(\hat{P}^2)$ и $\beta = \sigma^2(\hat{P}^2) / \hat{P}^2$. Средние значения P_0^2 и среднеквадратические ошибки, рассчитанные с использованием α и β по экспериментальным данным, представлены на рис. 9 и в табл. 1.

Из анализа рис. 9 и табл. 1 следует, что метод скользящего сглаживания P -slide дает результаты с минимальной дисперсией, а часто используемый различными авторами на практике метод R [1, 3] дает не только большую дисперсию, но и недопустимое по величине смещение оценки приведенной шумности. Данный результат представ-

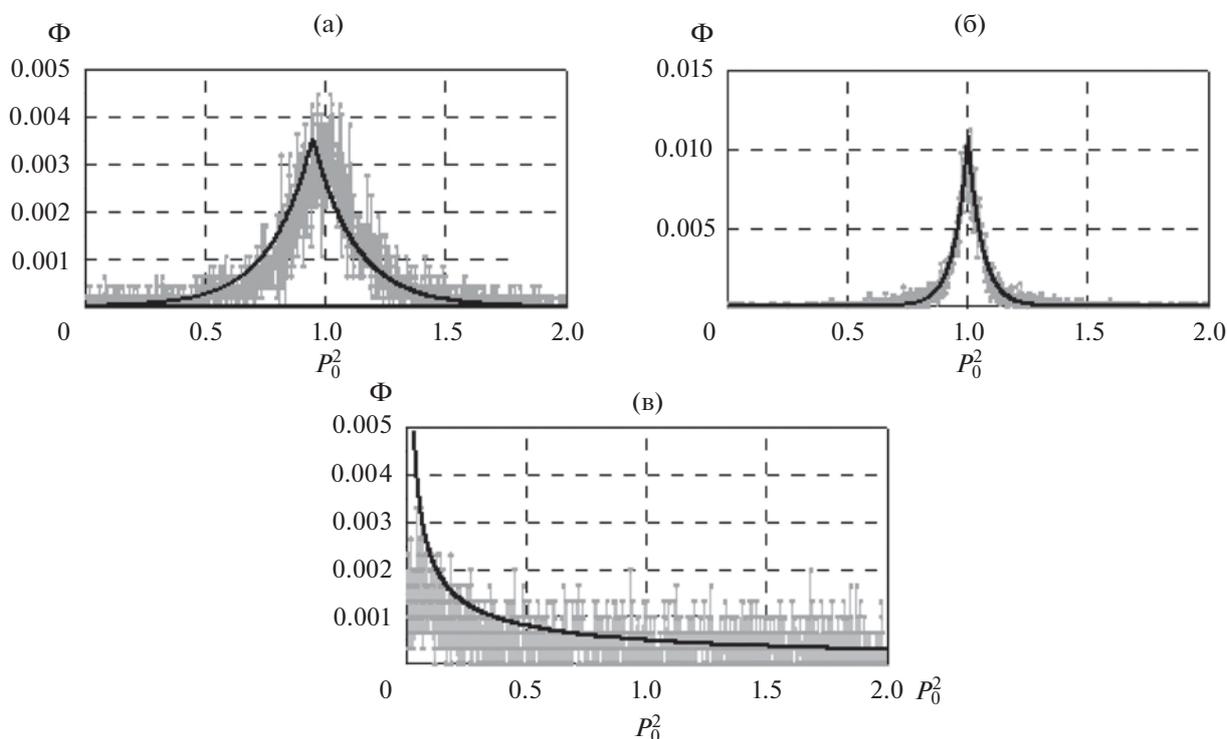


Рис. 9. Плотность вероятности оценки приведенной шумности источника для различных алгоритмов обработки; $f = 117$ Гц, $S/N = 1$; методы (а) – P , (б) – P -slide и (в) – R ; серое поле – экспериментальные данные, черные кривые – теория.

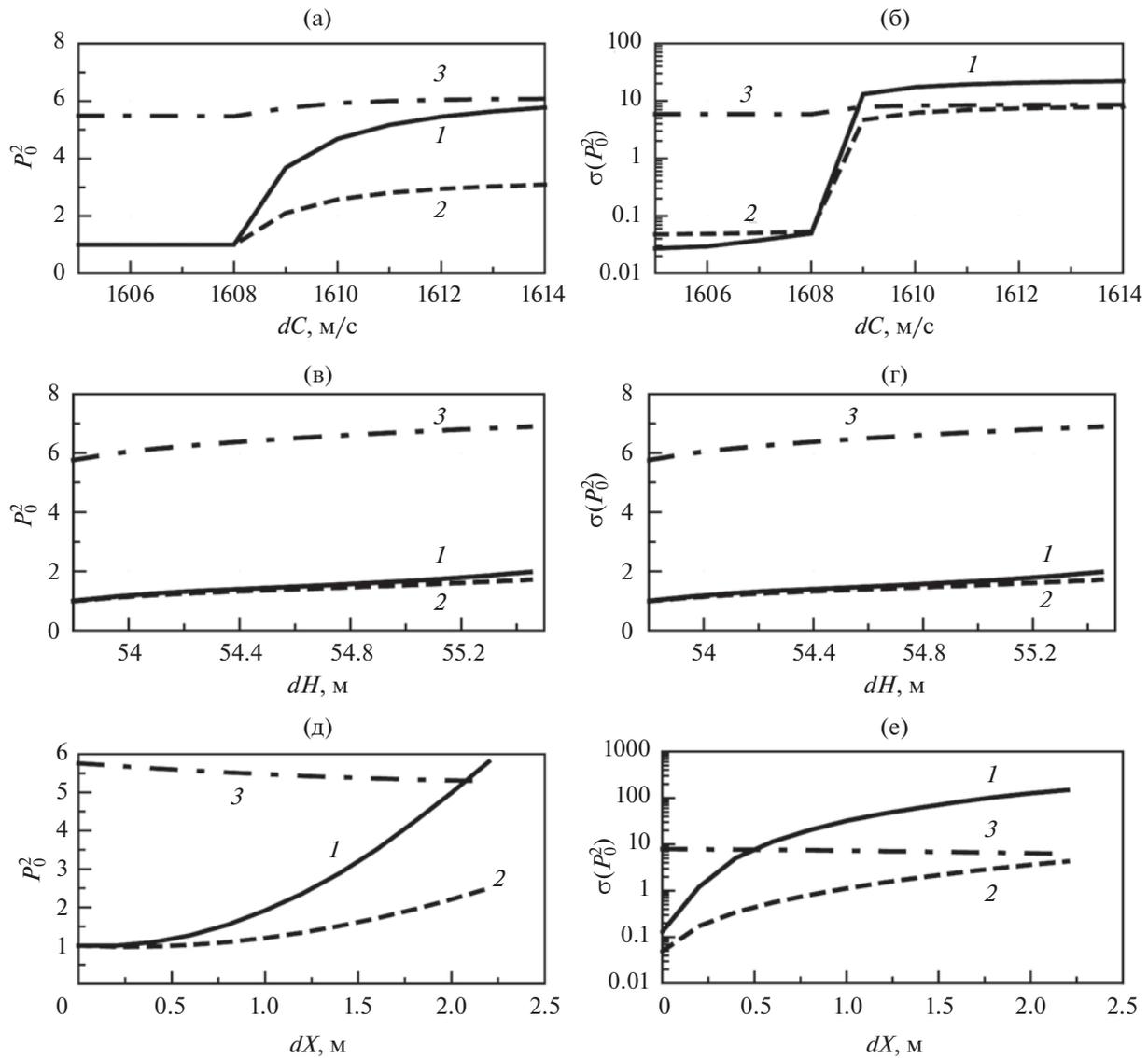


Рис. 10. (а, в, д) – Средние значения и (б, г, е) – средноквадратические ошибки оценок ЗД в зависимости от (а, б) – погрешности выбора скорости звука в грунте dC_b , (в, г) – от ошибки при задании глубины волновода dH_w и (д, е) – при определении координат источника x, y и z с ошибкой, равной dX ; $M = 16, S/N = 100$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют методам $P, P\text{-slide}$ и R .

ляется естественным, поскольку этот метод не учитывает интерференции сигнала и передаточной функции волновода.

Моделирование алгоритмов обработки позволяет оценить не только средноквадратическую погрешность оценки ЗД, но и величину смещения оценок, обусловленных методическими погрешностями. Установлено, что основной вклад дают ошибки, полученные при калибровке волновода и взаимном позиционировании. Как показал анализ этих ошибок, смещения оценки ЗД наиболее значимы при погрешностях в измерении координат источника сигналов, глубины волновода, скорости звука в грунте. Вариации плотности грунта или профиля скорости звука,

по крайней мере, на низких частотах, влияют значительно слабее. На рис. 10 приведены зависимости оценок ЗД от этих факторов. При расчетах полагалось, что помеха практически отсутствует, что дает возможность анализировать влияние на погрешности алгоритмов только вышеперечисленных факторов.

Видно, что при малых значениях смещения оценки ЗД изменяются плавно и принимают значения не более 10%. Скачок смещения ЗД на рис. 10а, 10б соответствует ситуации, когда число нормальных волн увеличивается на единицу по сравнению со значением, рассчитанным для модели при скорости продольных волн в грунте меньше, чем 1608 м/с. Соответственно, скачком

изменяются характеристики ПФВ и пересчитанные значения ЗД. Отметим, что даже при незначительном несоответствии глубины волновода истинным значениям ($dH_w \approx 2$ м) оценка ЗД определяется с ошибкой $\pm 50\%$. При ошибках взаимного позиционирования до 2 м оценка ЗД определяется также с ошибкой $\pm 50\%$. Обращает на себя внимание тот факт, что при оценке среднего значения с ошибкой $\pm 50\%$ нормированная среднеквадратическая ошибка увеличивается в значительно больших пределах. Этот факт может служить критерием для выработки требований при комплексной оценке методической погрешности, связанной с ошибками проведения вспомогательных (предварительных) экспериментальных работ — калибровка волновода, оценка геометрии антенн и взаимное позиционирование приемников и излучателей и т.д. Из табл. 1, в которой представлены нормированные значения среднеквадратической ошибки, полученные из экспериментальных данных, следует, что достигнутая точность решения перечисленных задач позволяет корректно решить основную задачу — распределить с малой погрешностью приведенное к расстоянию 1 м звуковое давление. При этом удается учесть в реальном времени движение источника, передаточную функцию волновода и геометрию эксперимента.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Погрешность оценивания приведенной шумности зависит от комплекса исследованных в статье влияющих факторов, определяющих методическую погрешность, а также от аддитивной помехи, которая при малом числе осреднений имеет мультипликативную составляющую. Для уменьшения методической погрешности необходимо построить и использовать при расчетах адекватную модель передаточной функции волновода, основанную на результатах акустической калибровки — идентификации модели и параметров грунта в волноводе. Необходимо также с высокой точностью оценивать геометрию приемной антенны, а также выполнять в реальном времени позиционирование излучателя относительно приемных элементов антенны. При правильном выборе полигона с однородными характеристиками (постоянной глубиной и однородными параметрами грунта) и применении отработанной технологии акустической калибровки волновода и позиционирования возможно построение адекватной модели передаточной функции волновода и уменьшение методических погрешностей. Учет этих факторов позволяет получить достаточно точные средние значения приведенных (пересчитанных) к 1 м величин ЗД с погрешностью не более 30%. Оценка приведенной шумности без учета передаточной функции даже при точном позиционировании дает недопустимо большие смещения и дисперсии.

Рекомендуется использовать в качестве критерия для комплексной оценки методической погрешности, связанной с ошибками, накапливающимися при проведении предварительных экспериментальных работ, значение нормированной среднеквадратической ошибки оценки ЗД. Причина в том, что при погрешностях, вызывающих значительные смещения оценки ЗД, нормированная среднеквадратическая ошибка оценки ЗД может в несколько раз превышать среднее значение ЗД.

Следует также отметить, что для оценивания приведенной шумности реальных морских объектов дополнительно следует учитывать направленность излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Но для этого необходимо использовать модель мультипольного источника [22]. Модель волновода в этом случае должна быть построена для источника, включающего, например, монополи, вертикальные и горизонтальные диполи, а также квадруполь с горизонтально и вертикально ориентированными осями [23]. Авторы предполагают выполнить и такое исследование.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы “Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн” (номер государственной регистрации АААА-А18-118021390174-1), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00941) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Urick R.J.* Principles of Underwater Sound. New York: McGraw-Hill, 1975.
2. *Cote O.R., Jr.* The 3rd Battle Innovation in the U.S. Navy’s Silent Cold War Struggle with Soviet Submarines. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2003.
3. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Гидроакустика на рубеже XX и XXI столетий. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
4. ANSI/ASA S12.64-2009. Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships — Part 1: General Requirements. 2009.
5. *McKenna M.F., Ross D., Wiggins S.M., Hildebrand J.A.* Underwater radiated noise from modern commercial ships // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131. № 1. P. 92–103. <https://doi.org/10.1121/1.3664100>
6. *Калью В.А., Таровик В.И., Чижов В.Ю.* Уменьшение подводной шумности коммерческих судов — актуальная задача судовой акустики // Сборник трудов Научной конференции “Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества”. Т. II. М.: ГЕОС, 2011. С. 218–222.

7. Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 605–613.
8. Теверовский В.И., Цыганков С.Г. Новые подходы и современные методы в измерениях гидроакустических морских объектов // Альманах современной метрологии. 2014. № 1. С. 102–118.
9. Song H.C., Gihoon Yuun. Extrapolating Green's functions using the waveguide invariant theory // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. № 4. P. 2150–2158.
10. Бармак А.С., Коротин П.И., Салин Б.М., Салин М.Б. Восстановление временной зависимости и параметров сигнала широкополосных протяженных акустических источников в дальней зоне // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 123–132.
11. Кузнецов Г.Н. Проблемы оценки приведенной шумности движущихся объектов в мелком море // Метрология гидроакустических измерений. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. Т. 1. С. 57–74.
12. Корчак В.Ю., Кузнецов Г.Н., Малышев В.Н. Построение гидроакустических систем с использованием векторно-скалярных модулей и антенн // Фундаментальная наука – военно-морскому флоту. 2018. Т. 3. С. 41–55.
13. Белов А.И., Боголюбов Б.Н., Кузнецов Г.Н. Калибровка низкочастотного излучающего комплекса в условиях мелкого моря // Труды VI международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований”. М.: ИО РАН, 2000. С. 139–147.
14. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 722–734.
15. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Методы и результаты акустической калибровки локальных зон мелкого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. № 8(1). С. 68–78.
16. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2016. Т. 62. С. 194–202.
17. Кузнецов Г.Н. Акустическая калибровка районов установки или буксировки протяженных антенн гидроакустических комплексов // Труды XIV Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 350–353.
18. Kuznetsov G.N., Alekseev V.I., Glebova G.M. Positioning of horizontal–vertically developed multielement arrays and vector-scalar modules // Phys. Vibr. 2001. V. 9. № 4. P. 235–241.
19. Hudson D.J. Statistics: Lectures on Elementary Statistics and Probability. Geneva, 1964.
20. Van Trees H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. New York–London: Wiley, 1971.
21. Glebova G.M., Kuznetsov G.N. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially vector-scalar modules // The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides. Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. Nizhny Novgorod: IAP RAS. 1998. V. 1. P. 109–137.
22. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Аппроксимирующие модели регулярной составляющей инфразвукового поля мультипольных источников в плоском волноводе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 378–390.
23. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Закономерности ослабления векторно-скалярных звуковых полей в зонах интерференционных максимумов // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 2. С. 203–213.
<https://doi.org/10.1134/S0320791919020084>