

УДК 534.286.2

Ю. В. Махнев, О. И. Пискунова, А. Т. Трофимов**Определение пространственного затухания нормальных волн
в мелком море**

Рассматриваются возможности оценки коэффициента пространственного затухания в низкочастотной области (<100 Гц) для отдельных нормальных волн и по интегральному звуковому полю, создаваемому движущимся кораблём. Использован импульсный метод для разрешения и получения дисперсионных кривых нормальных волн. Получены оценки коэффициента затухания, исследована возможность определения коэффициента затухания по шумовым сигналам судоходства.

Ключевые слова: коэффициент затухания, нормальная волна, волновод, фазовая скорость

Об авторах

Махнев Юрий Владимирович – старший преподаватель кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна». *E-mail*: vipkozlice@yandex.ru. 141980 Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19

Пискунова Оксана Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Трофимов Александр Терентьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Важным параметром, который характеризует распространение гидроакустических сигналов в волноводе, является коэффициент пространственного затухания (далее коэффициент затухания). Его используют при расчете дальности действия гидроакустических систем, в специальных программах по расчету полей сигналов [1] и реконструкции морского дна [3] для дальнейшего использования в акустической томографии и алгоритмах, согласованных со средой распространения гидроакустических сигналов.

За последние несколько десятилетий было сделано множество публикаций на тему оценки коэффициента затухания звука и влияния на него различных факторов. В работе [4] проведены обширные исследования по оценке коэффициента затухания в Средиземном, Черном, Японском и Балтийском морях. В этой работе сделана попытка определить взаимосвязь между параметрами акваторий (глубина, профиль скорости звука и др.) и величиной коэффициента затухания. Работы проводились в полосе частот от 500 Гц до 15 кГц. При этом оценивалось спадание уровня интегрального поля от расстояния.

В ряде работ [2; 3] исследуется затухание нормальных волн в зависимости от их порядкового номера и частоты. При этом рассматриваются первые 3 нормальных волны. Затухание определялось следующим образом: были произведены измерения амплитуд нормальных волн в трёх, равно удалённых от места излучения точках. В качестве приёмной системы выступали одиночные гидрофоны. Рассматриваемая полоса частот от 25 до 250 Гц. По экспериментальным данным подбирались параметры модели волновода таким образом, чтобы они наиболее точно описывали экспериментальные измерения.

В подавляющем большинстве других публикаций авторы ограничиваются теоретическим рассмотрением вопросов, связанных с затуханием волн, и компьютерным моделированием процессов. Как правило, рассматриваемые частоты лежат выше 250 Гц.

Во всех приведённых работах, в которых обрабатывались данные натурного эксперимента, оценка коэффициента затухания проводилась на некотором, пренебрежительно малом в сравнении со всей площадью, участке акватории. Полученные результаты затем интерполируются на весь район проведения эксперимента, допуская, что разница в оценках при небольших изменениях условий распространения волн будет незначительной.

Большинство исследователей отмечают, что коэффициент затухания сильно зависит от района проведения эксперимента (параметров волновода), вследствие чего получаемые оценки трудно обобщить для других морей и их районов, даже со схожими условиями. Следует отметить, что зачастую при работе на частотах выше 250 Гц нормальные волны практически не разрешаются, поэтому большинство исследователей оценивают коэффициент затухания по интегральному звуковому полю, а это в свою очередь не позволяет произвести оценки коэффициента затухания для каждой волны в отдельности, в следствие чего получаемая модель волновода имеет расхождения с практическими данными.

С целью получить достаточное разрешение, выделить отдельные нормальные волны и уточнить параметры волновода необходимо работать на частотах ниже 250 Гц, что в свою очередь наталкивается на ряд проблем, связанных с технической реализацией излучающего устройства, работающего на большой глубине и обеспечивающего достаточной мощности сигнал. Вместе с тем звуковая волна большой мощности наносит большой вред окружающей среде. Эти проблемы обсуждались на конференции [10]. В связи с этим проведение исследований затруднено. В приведённых выше публикациях, в которых оценка коэффициента затухания проводилась на частотах ниже 250 Гц, работы велись на определённых частотах, на которых позволял работать гидроакустический излучатель, или же использовались пневматические пушки малой мощности, и работа велась на малых дальностях.

Публикации, в которых оценка коэффициента затухания отдельных нормальных волн в низкочастотной области подтверждается обширными экспериментами, захватывающими большие по площади акватории, отсутствуют.

В связи с вышесказанным есть научный и практический интерес в определении коэффициентов затухания в области низких частот по отдельным нормальным волнам. Данная публикация является продолжением ряда исследований, результаты которых докладывались нами на всероссийской конференции по гидроакустике [6; 7; 9], и содержит оценки коэффициента затухания нормальных волн, полученных при обработке импульсных сигналов пневматической пушки с разнесённых приёмников.

Теоретическая часть

Оценку параметров нормальных волн можно произвести, если удаётся получить их дисперсионные характеристики. В данной работе использовался классический метод оценки дисперсионных характеристик нормальных волн – импульсный. В его основе лежит временное разделение пришедших на приёмник нормальных волн [5]. Обобщая данный метод, можно выделить два основных этапа: 1) получение спектрограммы принятого импульса; 2) оценка групповых скоростей нормальных волн $c_{гр}$ и их пересчет в фазовые скорости $c_{ф}$ по известному выражению

$$c_{ф} = \sqrt{c_{гр} \cdot c},$$

где c – скорость звука в воде.

В результате нормальные волны разделены и получены оценки их дисперсионных кривых, т.е. зависимости фазовой скорости нормальной волны от частоты.

Для оценки коэффициента затухания β использовался метод, описанный в [7],

$$I(r, \beta) = I_{изл} \cdot \frac{10^{-0.1 \cdot \beta \cdot r}}{r_0 \cdot r},$$

где $I(r, \beta)$ – интенсивность нормальной волны на расстоянии от источника излучения r ; r_0 – переходное расстояние; $I_{изл}$ – интенсивность излучения.

Переходное расстояние было выбрано равным трём глубинам волновода. В связи с тем, что пневматическая пушка излучает не идентичные импульсы, оценку коэффициента затухания приходится получать по каждому импульсу и затем результаты усреднять.

Снятая в ходе эксперимента зависимость $I_{эксп}(r)$ используется для оценки коэффициента β при решении оптимизационной задачи:

$$\min_{\beta} \left(\sum_r |I_{эксп}(r) - I(r, \beta)|^2 \right) \rightarrow \beta.$$

Экспериментальная часть

Судно с пневматической пушкой прошло по заданной траектории вокруг 10 приёмников, каждый из которых отстоит друг от друга на расстоянии 10–20 км. В заданных точках траектории движения судно останавливалось и производило несколько выстрелов из пушки. Точки останова выбирались таким образом, чтобы расстояние до одного из приёмников было равно 15–20 км, что является

достаточным для получения разрешения нормальных волн на низких частотах. Схема дви-

жения судна и взаимное расположение приёмников показаны на рис. 1.

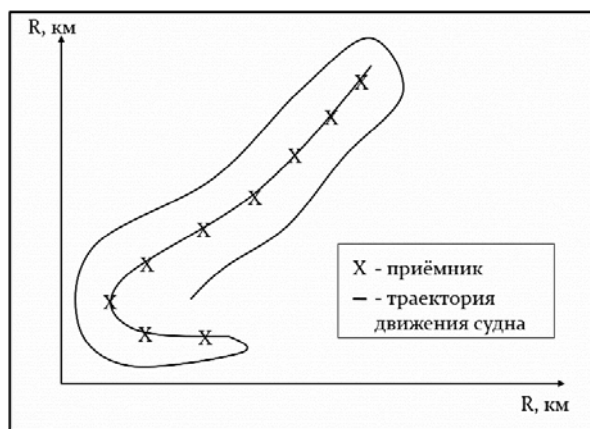


Рис. 1. Схема эксперимента

Используемая пневматическая пушка излучает короткий импульс длительностью около 1–3 мс. Диапазон частот, занимаемый этим импульсом, начинается с 7 и заканчивается на 80 Гц, в связи с чем в дальнейшей работе оценка коэффициентов затухания проводится в этом диапазоне.

В моменты излучения пневматическую пушку опускали на глубину 30 м.

Обсуждение и результаты

Каждая запись была обработана в соответствии с алгоритмами, представленными

в [7], были получены дисперсионные характеристики нормальных волн. Чтобы произвести оценку пространственного затухания, на каждой частоте, для каждой существующей нормальной волны в точке приёма были произведены оценки уровня энергии и сопоставлены с расстоянием до точки излучения.

Примеры получаемых зависимостей уровня энергии нормальных волн от расстояния представлены на рис. 2.

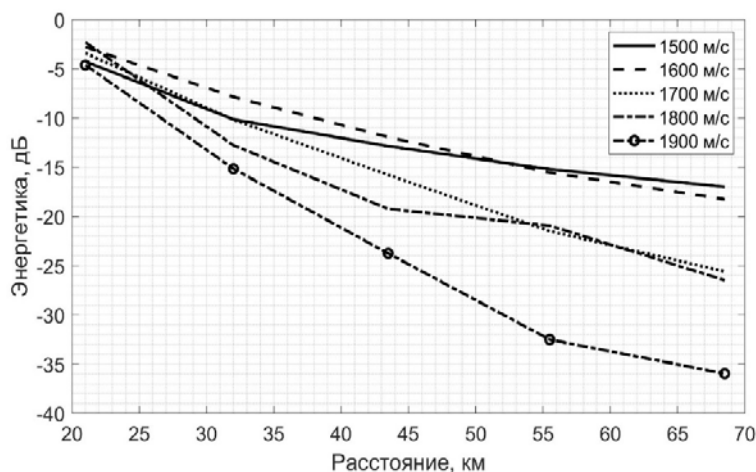


Рис. 2. Зависимость от расстояния энергетика нормальных волн с фазовыми скоростями 1500, 1600, 1700, 1800 и 1900 м/с на частоте 15 Гц

Из рис. 2 можно увидеть, что с увеличением расстояния нормальные волны затухают с разным коэффициентом затухания. Например, нормальная волна с фазовой скоростью

1500 м/с на 21 км на ~2 дБ меньше по энергетике волны 1600 м/с. Однако на отметке ~50 км они имеют практически одинаковую

энергетику, а на 65 км первая нормальная волна явно превосходит вторую.

Согласно методике, представленной в теоретической части, решалась оптимизационная задача по определению коэффициента

затухания для каждой нормальной волны. Для получения более гладкой зависимости коэффициента затухания от частоты оценки были интерполированы кубическим полиномом (рис. 3).

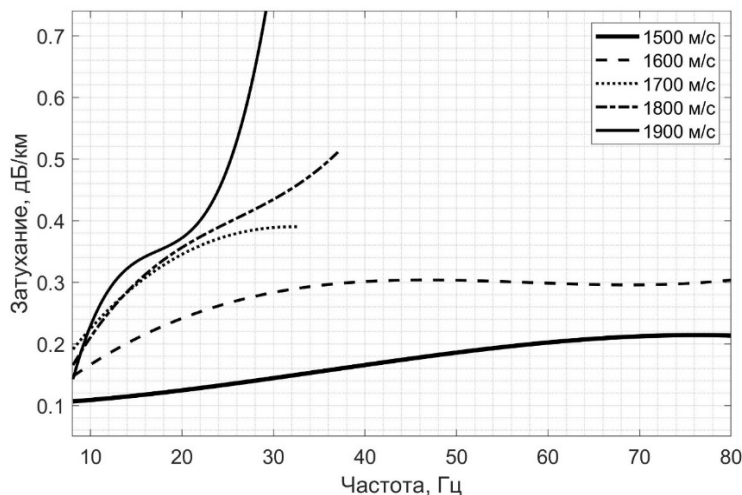


Рис. 3. Зависимости коэффициента затухания от частоты и диапазона фазовых скоростей нормальных волн

Прерывание линии графика для нормальных волн со скоростями больше 1600 м/с объясняется недостаточным отношением c/λ для получения качественных оценок.

В данной работе был проведён дополнительный эксперимент по определению коэффициента затухания по шумовым сигналам судоходства. Датчики записывали сигналы не только в моменты выстрелов пневматической пушки, но и между выстрелами. Как известно, шумовой спектр кораблей обладает дискретным звукоорядом. Зная звукооряд нашего судна, нами были получены оценки интенсивности дискретных составляющих и определена зависимость коэффициента затухания от частоты. Следует отметить, что в этом случае выделить нормальные волны не удалось, поэтому оценки затухания приведены для интегрального поля.

Для частот, на которых оценку коэффициента затухания произвести не удалось, дан-

ные были интерполированы. По этим данным построена линия тренда, показывающая изменение коэффициента затухания от частоты. Для сравнения на рис. 4 приведена теоретическая зависимость коэффициента затухания от частоты, эмпирически полученная и представленная в [8, с. 96]. Приведём выражение для получения теоретической кривой:

$$\beta = 0,11 \cdot \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \cdot \frac{f^2}{4100+f^2}.$$

Сравнивая экспериментальную и теоретическую зависимости, можно отметить, что расхождение в оценке коэффициента затухания на частотах в районе 10 Гц составляет 0,04 дБ/км, а в районе 70 Гц – 0,02 дБ/км. Дисперсия полученных оценок находится под теоретической кривой или на ней. Из этого можно сделать вывод о том, что оценка коэффициента затухания по шумовым сигналам судоходства выполнена успешно.

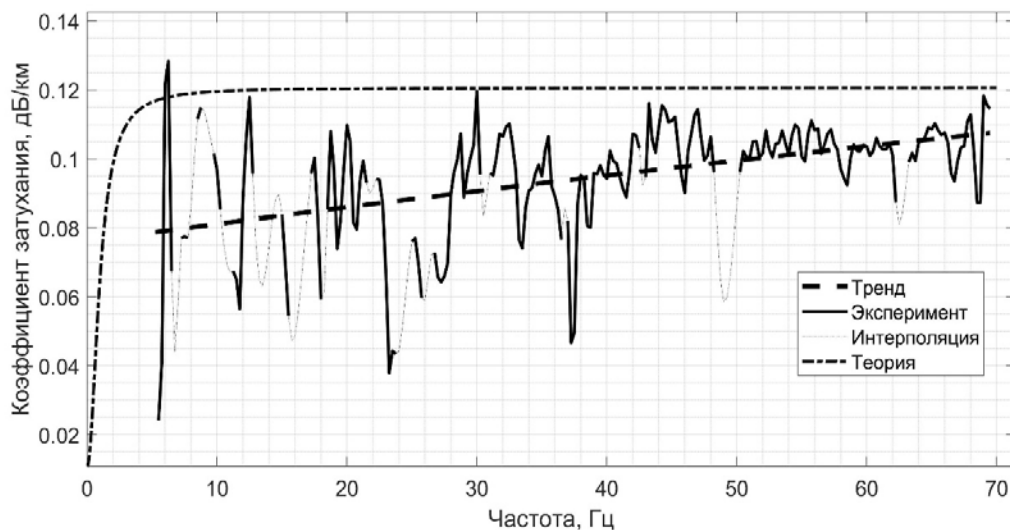


Рис. 4. Оценки коэффициента затухания (сплошная линия) в зависимости от частоты, полученные в результате наблюдения за дискретными составляющими судна

Выводы

В результате обработки большого массива экспериментальных данных были получены коэффициенты пространственного затухания в низкочастотной области в широкой полосе частот.

Согласно полученным оценкам коэффициентов затухания отдельных нормальных волн, можно сделать вывод о том, что на дальние расстояния распространяются только нормальные волны с фазовыми скоростями меньше 1700 м/с. Данный вывод можно использовать при построении гидролокационных систем.

Коэффициенты пространственного затухания определялись для каждой нормальной волны, согласно полученным импульсным методом дисперсионных кривых. Зависимости величины затухания от частоты и фазовой скорости нормальных волн представлены графически. Подтверждено, что коэффициент затухания тем больше, чем выше частота и фазовая скорость нормальной волны.

Также определение коэффициента затухания интегрального поля производилось на частотах, соответствующих дискретным составляющим из звукоряда судна, несущего пневматическую пушку. В работе показано сходство полученных результатов с теоретическими аналитическими выражениями.

Подтверждена возможность получения достоверных оценок коэффициента затухания по шумовым сигналам судоходства, что означает возможность получения этих оценок

в реальном времени в условиях абсолютной секретности.

Исследования выполнены в рамках базовой НИР кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» «Синтез интеллектуальных гидроакустических систем и систем физической защиты».

Библиографический список

1. Авилов К.В., Попов О.Е. Вычисление низкочастотных звуковых полей в трехмерно неоднородных моделях среды, включающих воду, воздух и грунт // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: сб. тр. XIV Всеросс. конф. СПб., 2018. С. 323–326.
2. Агеева Н.С., Крупин В.Д. Некоторые особенности затухания мод в мелком море с трёхслойным поглощающим дном // Акуст. журн. 1985. Т. 31, № 1. С. 1–6.
3. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Пространственное затухание различных составляющих звуковых полей в водном слое и в осадках мелкого моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 6. С. 614–622.
4. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде // Акуст. журн. 2000. Т. 46, № 5. С. 624–631.
5. Акустическая томография океана / В.В. Гончаров [и др.]. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997. 256 с.
6. Экспериментальная оценка затухания звука на низких частотах в различных районах Баренцева моря / А.В. Гринюк [и др.] // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: сб. тр. XII Всеросс. конф. СПб., 2014. С. 583–585.
7. Анализ пространственно-временных характеристик низкочастотных гидроакустических

сигналов в мелком море / А.В. Гринюк [и др.] // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: сб. тр. XIII Всеросс. конф. СПб., 2016. С. 376–378.

8. Лаврентьев Э.В., Кузян О.И. Взрывы в море. Библиотека инженера-гидроакустика. Л.: Судостроение, 1977. 157 с.

9. Махнев Ю.В., Трофимов А.Т. О возможности реализации согласованной со средой обработки для низкочастотного гидроакустического

волновода // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: сб. тр. XIV Всеросс. конф. СПб., 2018. С. 480–482.

10. Махнев Ю.В., Трофимов А.Т. Синтез сложных гидроакустических сигналов с использованием одиночных сверхширокополосных импульсов // 20-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2018». М., 2018. Т. 2. С. 496–499.

*Поступила в редакцию
23.12.2019*