

РАДИОФИЗИКА

УДК 534.6 (075.8)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РЕЧНЫХ СУДОВ

© 2011 г.

Ю.М. Заславский¹, В.Ю. Заславский²

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 17.01.2011

Представлены результаты обработки экспериментально зарегистрированных низкочастотных гидроакустических сигналов, создаваемых на речной акватории транспортными судами, прогулочными и спортивными катерами. Измерен уровень гидроакустических сигналов и характер амплитудного спада при распространении в естественно-природных условиях речной среды, проанализирован их спектральный состав. Одновременно с гидроакустическими зарегистрированы воздушно-акустические и донно-сейсмические сигналы от речных судов. По данным регистрации указанных сигналов получен одинаковый показатель амплитудного спада при распространении гидроакустических и донно-сейсмических сигналов, что характерно только для речных водоемов.

Ключевые слова: низкочастотный звуковой диапазон, гидроакустические сигналы, спектральный состав, уровень шума, речные катера.

В последнее время вопросы разработки активных и пассивных гидролокационных устройств, обеспечивающих проводку судов по рекам в режиме «автопилот», становятся все более актуальными. С целью автоматического управления судовождением разрабатываются гидроакустические системы контроля глубины и береговой линии водоемов. Эти системы могут найти применение также для решения и других проблем судоходства, дистанционной классификации судов, диагностики качества работы судовых силовых установок (контроль виброактивности) и т. д. Это требует все более глубокого изучения особенностей распространения гидроакустических волн в акватории крупных и малых рек в различных частотных диапазонах [1, 2], в том числе в низкочастотном, что составляет предмет исследований настоящей работы. Поэтому в дальнейшем необходимо сформировать полный ансамбль спектров низкочастотных гидроакустических сигналов от катеров и речных судов различного водоизмещения. Анализ особенностей распространения гидроакустических волн в специфических условиях мелководья имеет и фундаментальный научный интерес [1]. Например, важно установить доминирующие механизмы ослабления уровня гидроакустических волн по мере

распространения, определить частотную зависимость показателя суммарного ослабления волн при распространении в мелком водоеме, изучить влияние волноводных (дисперсионных) эффектов на трансформацию спектрального состава сигналов и др. Такие работы уже активно ведутся, для чего некоторые участки крупных рек за рубежом используются как полигоны [2]. В настоящей статье речь идет о гидроакустических сигналах в акватории рек Волга, Ока, Ветлуга, создаваемых движущимися по ним транспортными судами. Удобство их использования связано, в частности, с линейчатым спектральным составом гидроакустического сигнала от судна и возможностью проследить спад уровня дискретных линий в его спектре по мере возрастания дистанции источник – приемник. В данной работе основное внимание уделяется маломерным транспортным судам и спортивным катерам со стационарными и подвесными моторами.

При регистрации гидроакустических сигналов речных судов используется гидрофон (B&K[°] Type 8100, предусилитель B&K[°] Type 2536), установленный вблизи берега реки на глубине 0.5–1 м под поверхностью воды (рис. 1). Для контроля одновременно с гидроакустическим с помощью микрофона и геофона, распо-

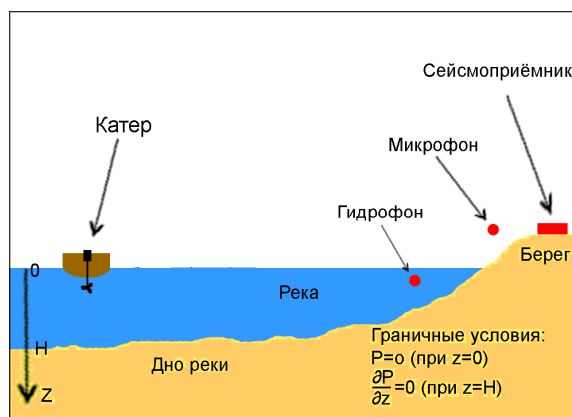


Рис. 1. Схема размещения приборов регистрации в реке и на берегу

лагаемых на берегу рядом с гидрофоном, регистрируются воздушно-акустический и донно-сейсмический сигналы. Их запись осуществляется на другие каналы ноутбука, после чего выполняется обработка сигналов: согласованная фильтрация (при высоком уровне шумового фона) и спектральный анализ. Сигналы регистрируются в интервале дистанций источник – приемник $\sim 40\text{--}500$ м. Совместная регистрация и обработка всех видов сигналов позволяет интерпретировать физические механизмы генерации волн. При текущем спектральном анализе сигналов, принятых на указанных удалениях от катера, используется временное окно длительностью $T = 0.5$ с. В результате анализа прослеживается эволюция спектра по мере смены дистанции и зависимость спада уровня гидроакустического излучения на фиксированных частотах, характерных, в частности, для звукоряда вальных гармоник частоты вращения гребного винта.

Рассмотрим некоторые результаты спектрального анализа гидроакустических сигналов, возникающих при движении по реке катеров с подвесными лодочными моторами и со стационарно установленными двигателями. На рис. 2 представлены текущий спектр и два фрагмента разреза амплитудного спектра гидроакустического сигнала металлокорпусного катера с подвесным отечественным мотором, зарегистрированного на р. Ветлуга на дистанции 100 м и 40 м до источника при скорости движения ~ 15 км/час.

Частотная полоса анализа в случае рассмотрения картины текущего спектра принята 0–200 Гц, а на фрагментах спектральных разрезов 0–500 Гц. В первом случае присутствует единственная дискретная компонента на частоте $\sim 35\text{--}40$ Гц. Это вальная или оборотная частота вращения вала гребного винта. На этой частоте происходит наиболее интенсивное излучение гидроакустического сигнала. Его причиной мо-

жет быть как работа гребного винта, так и вибрация всего корпуса. Второй случай (рис. 2б) соответствует прохождению катером траверса. На близких дистанциях частотная полоса сигнала расширяется до ~ 280 Гц, а наибольшим уровнем обладает спектральная амплитуда на частоте ~ 90 Гц. Изменение уровня гидроакустического сигнала при приближении катера с жестким корпусом к линии траверса представлено на рис. 3. Дистанция, пройденная им от точки на трассе, соответствующей моменту включения регистратора (начало регистрации соответствует уровню шумов), до линии траверса (где достигается максимум уровня), составляет $\sim 350\text{--}400$ м. Наблюдаемое при этом увеличение среднего уровня – общий перепад на такой дистанции измеряется величиной $\sim \Delta L \cong \cong 15\text{--}20$ дБ. Нетрудно получить оценку коэффициента затухания гидроакустического сигнала, а также стандартную характеристику – величину волновых потерь на километровой дистанции на данном участке реки. Для этого следует из ΔL вычесть $10 \lg \frac{400 \text{ м}}{40 \text{ м}} = 10$ дБ, описы-

вающие фактор геометрической расходимости волнового фронта на дистанциях от r_1 до r_2 , соответствующих ближнему и дальнему пунктам регистрации на трассе. Разница в 5–10 дБ обусловлена диссипативными потерями в канале, т. е. $20 \lg e^{-\alpha(r_2-r_1)} \cong 5\text{--}10$ дБ, откуда $\alpha \approx 0.064 \text{ м}^{-1}$, а волновые потери по порядку составляют ~ 26 дБ/км. Анализ частотной зависимости коэффициента поглощения, проведенный по данным натурных измерений, на чем здесь подробно не останавливаемся, показывает, что с увеличением частоты имеет место его рост,

близкий к линейному $\alpha = \frac{\theta \omega}{2c}$, где θ – декре-

мент затухания волны, ω – частота, c – фазовая скорость волны. Поскольку такой характер типичен для сейсмических волн [3], последнее свидетельствует о существенном влиянии дна на поглощение при распространении в речной среде. Учитывая преобладающую в спектре частоту ~ 40 Гц и скорость распространения волны 1500 м/с, нетрудно получить оценку эффективного значения декремента поглощения $\sim \theta \approx 0.3\text{--}0.4$. Отмеченный результат пока мало изучен и в литературе обсуждается еще недостаточно всесторонне. Видно, что в отличие от морской среды, где потери на распространение имеют ничтожную величину (0.0002 дБ/км [1]), гидроакустический сигнал в реке затухает практически столь же сильно, как сейсмический

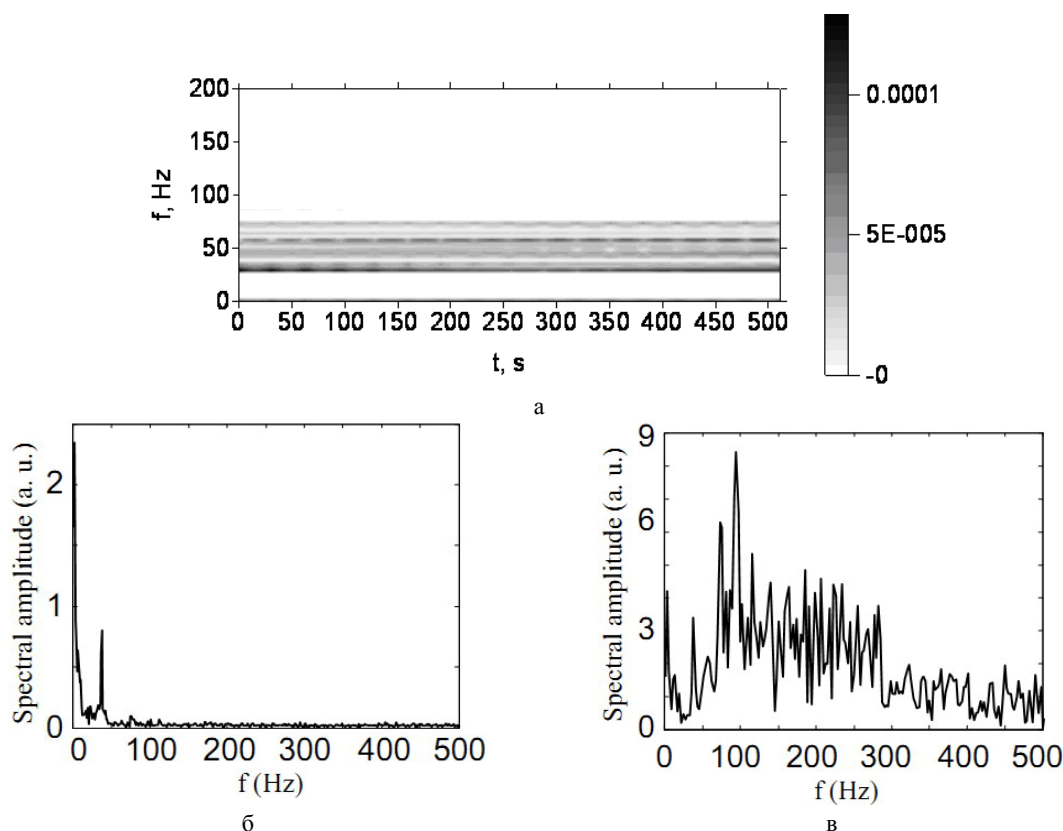


Рис. 2. Текущий спектр гидроакустического сигнала катера с отечественным подвесным мотором – а. Фрагменты амплитудного спектра на дистанциях: б – 100 м, в – 40 м. Масштаб амплитуд – в относительных единицах. Акватория р. Ветлуга

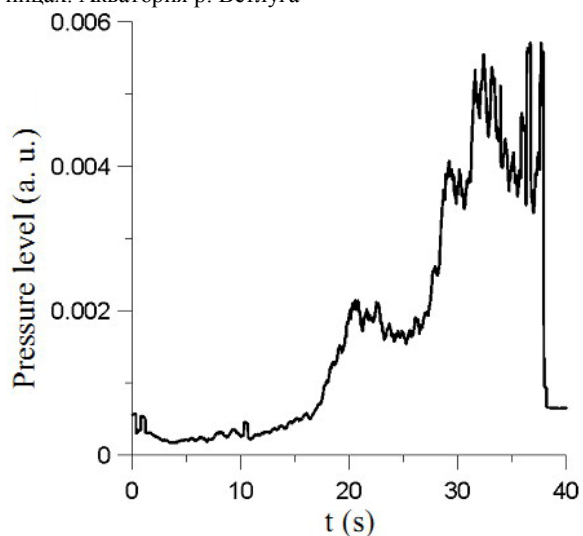


Рис. 3. Кривая изменения уровня гидроакустического сигнала от катера при его приближении к траверсу. После прохода линии траверса – резкое торможение

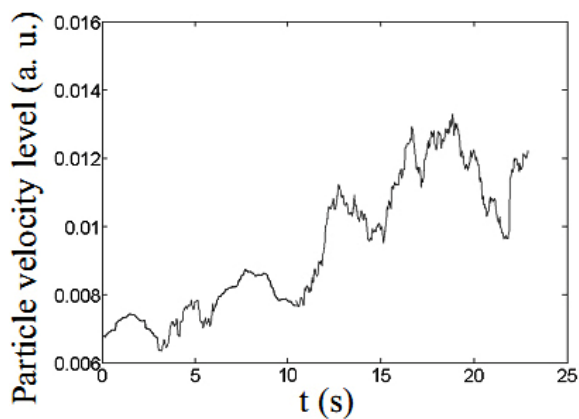


Рис. 4. Кривая изменения уровня донно-сейсмического сигнала от катера при его приближении к траверсу

(грунтовая волна) – в донном грунте. В первом случае неглубокого дна и близости берегов мы можем сравнить это с распространением звука в жидкости, заполняющей узкую трубу с поглощающими стенками, где и сосредотачиваются все волновые потери. В другом – для распространения в глубоководном канале морской среды аналогом будет безграничная жидкость. На рис. 4 демонстрируется нарастание уровня

донно-сейсмического сигнала, возникающее при проходе того же катера, которое подтверждает высказанное утверждение. Наблюдается такой же скачкообразный характер изменения уровня, и общий его перепад имеет тот же порядок. На рис. 5 представлен фрагмент спектра воздушно-акустического шума в интервале частот 0 – 1000 Гц. Он иллюстрирует значительное отличие характера распределения по частоте

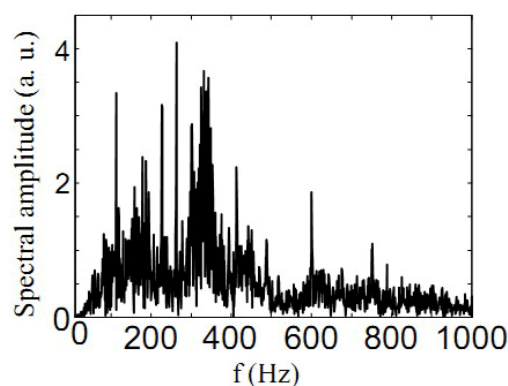


Рис. 5. Амплитудный спектр воздушно-акустического шума отечественного лодочного мотора, установленного на металлокорпусном катере. Спектральные амплитуды – в относительных единицах

спектральных компонент этого шума от распределения дискрет в спектре гидроакустического сигнала. Это указывает на преобладающую роль вибрационного или гидродинамического механизма генерации гидроакустических сигналов (на частоте вращения гребного винта) при незначительности эффекта проникания в воду воздушно-акустических шумов. При этом остается открытым вопрос об источнике, доминирующем в фактически регистрируемом излучении: либо им является вибрация корпуса, либо – гидродинамические пульсации в кильватерной струе, создаваемые гребным винтом.

Из сравнения спектров воздушно-акустических сигналов, представленных в настоящей работе, со спектрами гидроакустических и вибросигналов можно видеть различие в их преобладающих частотах. В отличие от этого имеет место сходство спектров низкочастотной вибрации корпуса судна и спектров гидроакустических сигналов, зарегистрированных в жидкости на некотором удалении от судна. По представленным в [2] данным исследования взаимной связи вибро- и гидроакустических сигналов, создаваемых как маломерными, так и крупными судами речного и морского флота, в указанных спектрах преобладает набор дискрет с частотами циклических процессов, характерных для силовых и энергетических судовых установок, и кратные им.

Гидроакустические сигналы, спектры которых рассмотрены выше, характерны для катера с отечественным подвесным лодочным мотором. К настоящему времени все чаще эксплуатируются современные лодочные моторы более высокой мощности, чем у представленных, но одновременно с этим имеющие пониженную воздушно-акустическую шумность, что связано с рыбопромысловым назначением соответствующих катеров. Это лодочные моторы Mercury, SEAPRO, Suzuki и т. д. Далее представим спектры гидроакустических сигналов,

создаваемых катерами, снабженными современными малошумными моторами. На рис. 6 демонстрируются спектры гидроакустического сигнала, возникающего при движении резинокорпусного катера-катамарана по акватории р. Ветлуга со скоростью ~ 20 км/час с установленным на нем вышеуказанным типом подвесного лодочного мотора. На рис. 6а дается текущий спектр, соответствующий отрезку реализации длительностью ~ 7 с вблизи траверса, а на остальных трех – фрагменты спектра, соответствующие регистрации в точках, расположенных до траверса (рис. 6б), вблизи линии траверса (рис. 6в) и после прохода катером линии траверса (рис. 6г).

Окно анализа $T = 2$ с, а частотная полоса в этом случае выбрана 0 – 200 Гц. Соответствующие спектры, как и показанные ранее, получены после проведения предварительной обработки – согласованной фильтрации сигнала. Спектральный состав практически одинаков во всех перечисленных случаях и состоит из двух компонент: одной – на частоте $f_1 \approx 38 - 39$ Гц, второй – в виде слабо разрешаемого дублета $f_2 \approx 76 - 78$ Гц, $f_3 \approx 81 - 83$ Гц. Частота первой – это вальная частота оборотов гребного винта, а второй – соответствует ее второй гармонике. Уровень спектральных компонент на траверсе наибольший относительно случаев приближения к нему (рис. 6б) и последующего удаления от него (рис. 6г). Кроме того, имеет место еще более резкое спадание уровня спектральных составляющих на частотах f_2, f_3 и при удалении катера на 100 м в спектре доминирует лишь первая из перечисленных компонент.

Характер нарастания интегрального уровня сигнала при приближении гидроакустического источника к траверсу и последующий его спад при удалении от него дают важную информацию о волновом канале. Соответствующая кривая демонстрируется на рис. 7. Попутно отме-

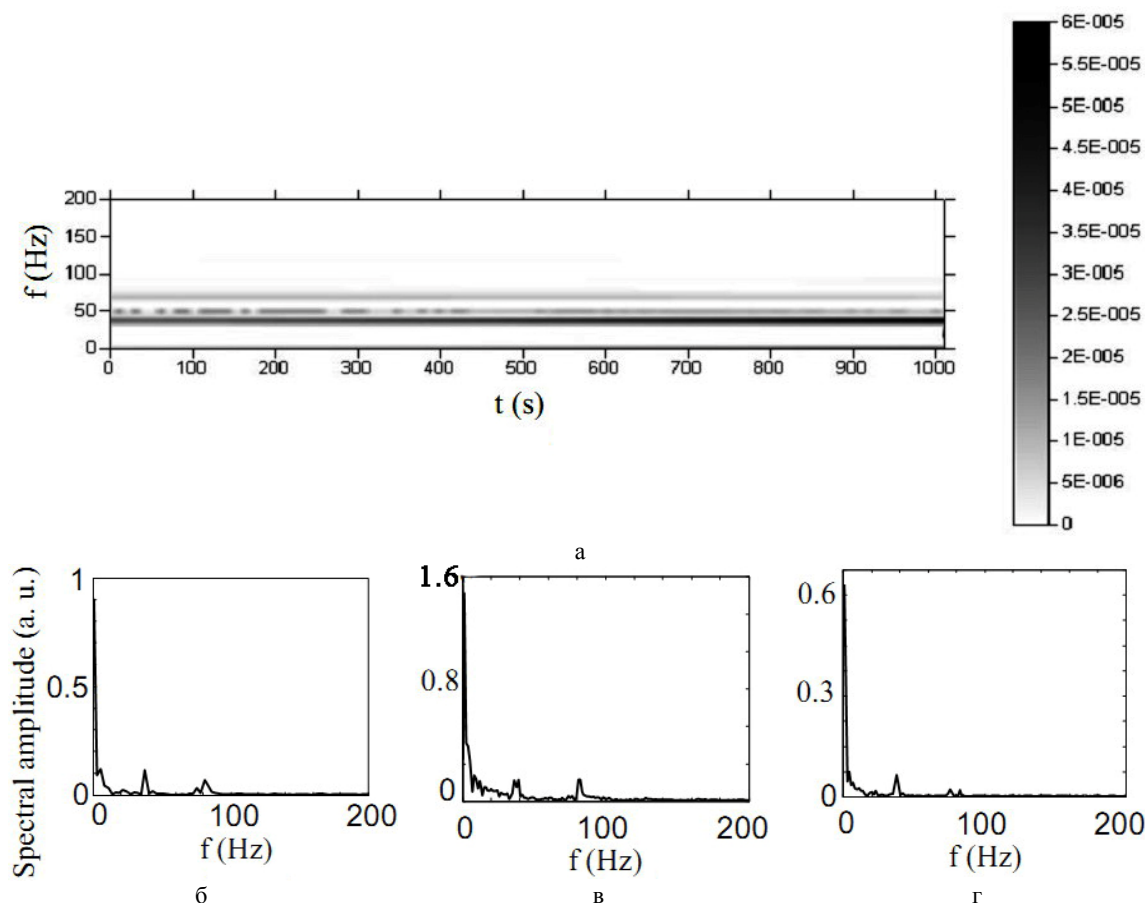


Рис. 6. Спектр гидроакустического сигнала, создаваемого резинокорпусным катером-катамараном: а – текущий спектр; фрагменты спектров на дистанциях: б – 150 м (до линии траверса), в – 30 м (на линии траверса), г – 100 м (после прохождения траверса). Спектральные амплитуды – в относительных единицах. Акватория р. Ветлуга

тим, что примерно за тот же интервал времени, как и в прежнем эксперименте (см. рис. 3), уровень сигнала теперь успевает достичь максимума (линия траверса) и вновь снизиться до значений, близких к минимальным, что объясняется более высокой скоростью движения этого катера. Проведенная по результатам обработки гидроакустического сигнала в обследуемом участке реки оценка постоянной затухания – характерной величины потерь гидроакустических волн показала, что она близка к ранее указанному значению ~ 26 дБ/км.

Эти данные представляют фундаментальный научный интерес, в частности, они показывают, что амплитудный спад гидроакустического сигнала, распространяющегося по реке, значительно выше аналогичного для случая распространения по глубокой морской воде и близок к спаду донно-сейсмического сигнала [2–7]. Аномально высокое значение параметра, характеризующего ослабление звука, в обоих этих случаях свидетельствует о существенном влиянии дна на его поглощение при распространении в речной среде. Как сказано ранее, линейный рост

коэффициента затухания с увеличением частоты служит дополнительным этому подтверждением. Еще более резкие изменения уровня поля наблюдаются в области ближней зоны источника, что связано с фактором геометрической расходимости, поэтому для исключения его влияния представленная здесь зависимость начинается с дистанций не ближе ~ 40 м. Напомним, что спектральный состав гидроакустического сигнала в рассматриваемом случае сосредоточен практически на частоте 40 Гц. При графическом представлении амплитудных спектров и уровня сигналов используется относительный масштаб, который является инвариантным во всех экспериментах с разными катерами. Это позволяет делать сравнение уровней, причем из рис. 2 и рис. 6 нетрудно видеть, что амплитуда спектральной компоненты сигнала на частоте 40 Гц у катера с отечественным мотором выше, чем у его современного аналога в одинаковых условиях. Одновременно с этим (ср. рис. 3 и рис. 7) также имеет место заметное превышение интегральным уровнем сигнала от металлокорпусного катера аналогичной величины для ре-

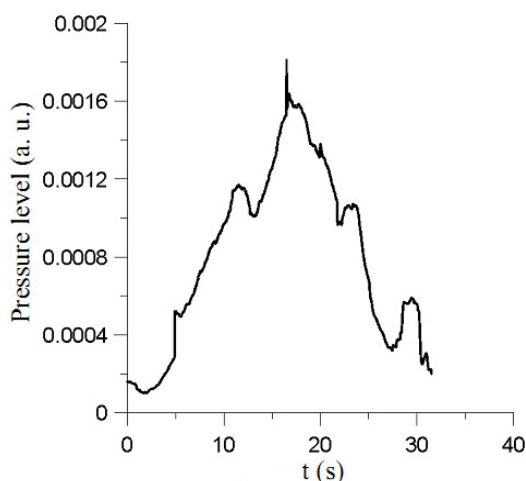


Рис. 7. Кривая изменения уровня гидроакустического сигнала от катера-катамарана при его приближении к линии траверса и последующем удалении

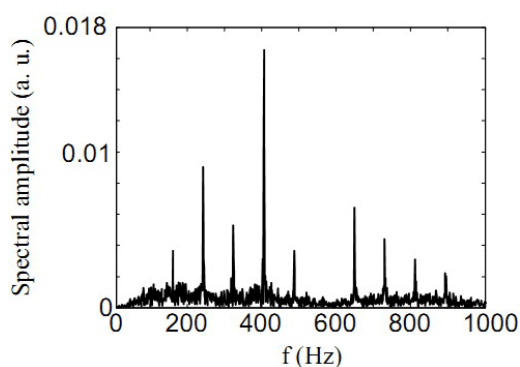


Рис. 8. Амплитудный спектр воздушно-акустического шума от резинокорпусного катера-катамарана. Масштаб амплитуд – относительный

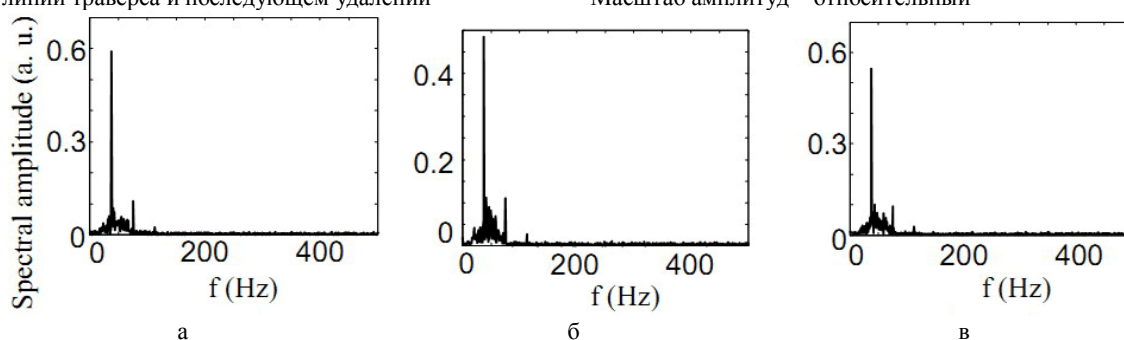


Рис. 9. Фрагменты спектра гидроакустического сигнала катера со стационарным двигателем на дистанциях: а – 350 м (до траверса), б – 200 м (траверс), в – 450 м (после прохода линии траверса). Акватория р. Волга. Масштаб амплитуд – относительный

зинокорпусного катера-катамарана (в 2.5 раза на траверсе). Последнее свидетельствует о значительном вкладе в уровень излучения, создаваемого вибрацией корпуса металлокорпусного катера, который отсутствует у катера-катамарана.

Амплитудная калибровка сигналов позволила определить абсолютные значения уровней гидроакустического излучения от различных катеров. Опуская детали расчета абсолютных значений их уровня, перечислим некоторые из полученных в работе данных. В частности, указанные абсолютные значения при регистрации на минимальном удалении ~ 40 м от металлокорпусного катера достигают ~ 0.5 Па (88 дБ относительно 20 мкПа). На том же удалении от резинокорпусного катера-катамарана аналогичная величина $\sim 0.1\text{--}0.2$ Па (80 дБ), что характерно для сигнала, создаваемого металлокорпусным катером на дистанции ~ 100 м от него. Такие данные могут найти применение в решении вопросов классификации судов, при проведении дистанционного контроля работы механизмов и диагностики виброактивности узлов силовой установки судна.

С той же целью, что и на рис. 4, на рис. 8 демонстрируется амплитудный спектр воздушно-

акустического шума лодочного мотора, установленного на резинокорпусном катере-катамаране. Положение спектральных компонент на оси частот и характер их амплитудного распределения дают информацию о частоте оборотов двигателя, а также служат подтверждением того, что гидроакустический сигнал создается источником периодического возмущения в жидкости, а не за счет проникания туда воздушно-акустического шума.

Представим еще один пример (см. рис. 9) анализа гидроакустического сигнала, зарегистрированного на больших удалениях от источника ($\sim 200\text{--}500$ м), чем на ранее показанных. В этом случае катер с установленным на нем стационарным двигателем движется по акватории р. Волга с более высокой скоростью $\sim 35\text{--}40$ км/час. Первая гармоника вальной частоты 37.5 Гц преобладает по амплитуде, а следующими являются высшие гармоники с частотами 75 Гц, 112.5 Гц, кратными основной.

Местоположение спектральных компонент по частоте, а следовательно, значение оборотной частоты вала гребного винта близко к аналогичному значению для выше рассмотренных катеров, но спектральные линии имеют существ-

венно меньшую ширину, чем в предыдущих случаях. Это свидетельствует о более высокой стабильности работы силовой установки быстрого катера, чем у катеров с подвесными моторами. Максимальное значение уровня сигнала на гидрофоне для дистанции в несколько сотен метров от указанного катера может быть порядка ~ 0.01 Па. Отметим, что в речной акватории, имеющей километровый масштаб по ширине, на удалениях от источника в несколько сот метров, увеличение до ~ 1.5 раз дистанции источник – приемник не всегда приводит к соответствующему изменению уровня сигнала. Последнее может объясняться эффектом маскировки из-за наложения хаотической амплитудной изменчивости, связанной с флуктуациями глубины или профиля речного дна на трассе распространения, на регулярную зависимость от дистанции уровня низкочастотного гидроакустического сигнала, определяемую факторами геометрической расходимости фронта волны и волновой диссипации.

Выводы

1. В натуральных экспериментах в акватории малых и крупных рек измерен абсолютный уровень низкочастотных гидроакустических сигналов, порождаемых разными видами катеров на удалениях от них до нескольких сотен метров. Получен их спектральный состав, из которого следует, что преобладающими являются дискретные компоненты на оборотной частоте вала судового движителя (первые десятки герц) и кратные ей. Источником звука в воде являются вибрация корпуса и пульсации давления, создаваемые работой гребного винта.

2. Измеренная в эксперименте абсолютная величина показателя ослабления уровня гидроакустического сигнала, распространяющегося в естественно-природных речных условиях, оказалась аномально высокой по отношению к ана-

логичной для глубоководных трасс в морской среде. Абсолютная величина характерной величины волновых потерь гидроакустического сигнала (на частоте 40 Гц) оценивается как ~ 26 дБ/км, близка по порядку величины аналогичной для донно-сейсмического сигнала, откуда следует, что решающим фактором понижения уровня сигнала при его распространении в мелководном речном акустическом канале является проникание гидроакустической волны из воды в донный грунт.

3. Полученные данные необходимы для создания гидроакустических систем автоматической проводки судов по рекам и водоемам, систем дистанционного контроля технического состояния средств судоходства и пр.

Список литературы

1. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Судостроение Л.: 1978. С. 129.
2. Vračar M. Spectral characterization of the hydroacoustic field of the vessel in the river environment // Scientific Technical Review. 2006. Vol. LVI. No. 3–4. P. 59–67.
3. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М.: Недра, 1981. 464 с.
4. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Экспериментальный анализ донно-сейсмических и гидроакустических сигналов от речных судов // Труды XII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». М.: ГЕОС, 2009. С. 264–267.
5. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. К анализу воздушно-акустического поля катера на воздушной подушке // Вестник ННГУ. 2009. № 3. С. 56–67.
6. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Сейсмические колебания берегового грунта, создаваемые моторной лодкой // Акустика неоднородных сред / Под ред. проф. С.А. Рыбака. 2008. С. 115–126.
7. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Сейсмические колебания берегового грунта, создаваемые моторной лодкой. Препринт № 767 ИПФ РАН. Н.Новгород, 2008. 19 с.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF HYDRO-ACOUSTIC SIGNALS GENERATED BY RIVER BOATS

Yu.M. Zaslavsky, V.Yu. Zaslavsky

Low-frequency hydro-acoustic signals generated by river-going cargo/passenger ships, pleasure and sporting boats have been registered experimentally and the results of their processing are presented. The level of hydro-acoustic signals has been measured and an amplitude-decreasing pattern during the signal propagation under natural conditions in river environment is analyzed together with the signal spectral characteristics. Air-acoustic and bottom-seismic signals from river vessels have been registered simultaneously with the hydro-acoustic signals. A strong similarity in amplitude-decreasing patterns of hydro-acoustic and bottom-seismic signals has been revealed which is typical only of rivers.

Keywords: low frequency sound range, hydro-acoustic signals, spectral composition, noise level, river boats.