

Нормативные аспекты метрологии

УДК 006.3:534.6

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ
ИЗМЕРЕНИЙ ПОДВОДНОГО ШУМА, ИЗЛУЧАЕМОГО
КОММЕРЧЕСКИМИ СУДАМИ****А.М. Еняков, О.А. Панин, С.В. Сильвестров**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,

e-mail:enyakov@vniiftri.ru

Обсуждаются вопросы развития и совершенствования нормативной базы в области метрологического обеспечения коммерческого судоходства, перспективы обеспечения единства измерений в данной области.

Ключевые слова: подводное шумоизлучение, методы измерений, эталоны.

Развитие судоходства, активное освоение шельфа и тотальное ухудшение экологической обстановки в прибрежных зонах Мирового океана приводят к необходимости оценки влияния антропогенного воздействия на морскую экосистему.

В последнее десятилетие проблемы, связанные с влиянием подводного шума на морскую фауну, вышли на международный уровень, включая структуры ООН. В 2008 г. Международная комиссия по изучению китов (IWC - International Whaling Commission) установила ближайшие цели мероприятий по снижению подводной шумности коммерческих судов: на 3 дБ в диапазоне частот от 10 до 300 Гц в течение ближайших 10 лет и на 10 дБ в течение 30 лет. В 2008 г. Международная морская организация (ИМО – International Maritime Organization), созданная при ООН, приняла в качестве высокоприоритетной программу работ «Шум от коммерческого судоходства и его влияние на морскую фауну» (Noise from commercial shipping and its adverse impacts on marine life), имеющей целью разработку рекомендаций по снижению шумности коммерческих судов. В процессе этих работ было установлено [1], что около 10 % самых шумных судов в мире ответственны на 50–90 % за общее шумовое «загрязнение» Мирового океана (It is estimated that only the noisiest 10% of ships contribute between 50% and 90% of the overall noise pollution). И хотя такие оценки недостаточно корректны (шумоизлучение судов разного назначения существенно различается, так, например, шум даже современных ледоколов может быть на 30–40 дБ выше шума рыбопоисковых судов – см. ниже), авторы [1] приходят к заключению, что при идентификации этих 10 % судов можно «существенно снизить шумовое загрязнение мирового океана». Их выводы нашли свое продолжение: в 2009 г. ИМО призвала государственные структуры и промышленность провести ревизию национальных коммерческих флотов для выявления наиболее шумных судов и совершенствовать их конструкцию для уменьшения

излучаемого ими подводного шума. На европейском уровне это инициировало выпуск Рамочной директивы по Морской стратегии Евросоюза (EU Marine Strategy Framework Directive) о необходимости контроля подводных шумов, вызванных судоходством, для достижения «хорошего состояния окружающей среды» (good environmental status) в европейских водах. Еврокомиссия и страны-члены Евросоюза в настоящее время разрабатывают критерии и методологические стандарты для определения этого «good environmental status». Оценку такого «состояния» можно получить путем мониторинга уровней подводного шума и прогнозирования его изменения. В рамках этой директивы предполагается проводить измерения подводного шума, излучаемого коммерческими судами, и такие измерения могут сопровождаться правительственными поручениями в соответствии с международными обязательствами по линии ИМО и правил Евросоюза. [1]. Однако эти планы могут быть реализованы лишь при достаточно достоверной оценке неопределенности измерений подводного шума, которая в настоящее время соизмерима с ближайшими задачами по его снижению (3 дБ), а иногда и превышает их.

Таким образом, не за горами тотальный контроль шумоизлучения коммерческих судов, как это уже реализовано в военно-морском флоте большинства развитых стран. Отечественное гражданское судостроение и наши компании-судовладельцы еще не готовы к такому повороту событий и не проявляют поэтому интереса к достоверной оценке акустического качества кораблей, плавающих под российским флагом. Подтверждением этого факта является, в том числе, отсутствие в наших структурах по стандартизации комитета (или подкомитета) по гидроакустике, зеркального подкомитету SC3 «Гидроакустика» в Комитете ИСО ТК43 «Акустика», а значит, и каких-либо планов по стандартизации измерений подводного шума гражданских судов.

В последние годы все чаще публикуются результаты исследований влияния подводных шумовых воздействий различного характера на рыб и морских млекопитающих, на их способность к навигации, общению и воспроизводству в условиях интенсивного судоходства и производственной деятельности человека. Адекватная оценка и сопоставимость результатов таких исследований, проводимых многими учеными в разных условиях и на разных акваториях, невозможны без определенной договоренности об измеряемых параметрах шума, условиях и методике их измерений. И такие договоренности разумнее всего закрепить соответствующими международными стандартами.

Стандарты в области измерений подводного шума

Одна из первых попыток разработки международного стандарта уже предпринята Международной организацией по стандартизации – ISO (the Альманах современной метрологии, 2015, №5

International Organization for Standardization). Проект стандарта ISO 17208-1 разрабатывался в подкомитете SC1 «Шум» технического комитета TC43 «Акустика» ISO в качестве стандарта ИСО, но по результатам голосования (более 50 %, но менее 2/3 голосов) был принят только в виде ISO/PAS (ISO Publicly Available Specification) – общедоступной спецификации [2]. В настоящее время он передан в недавно образованный подкомитет SC3 «Гидроакустика» для доработки и выпуска в качестве стандарта ИСО. Проект этого стандарта практически полностью повторяет текст американского стандарта [3], принятого в 2009 году американским Комитетом по стандартизации S12 (шум). В подготовке последнего документа участвовали 45 организаций США, около 50 экспертов в области измерения подводного шума. Остановимся кратко на содержании стандарта [3], а значит и ISO/PAS 17208-1:2012.

В стандарте США изложены требования к измерительным системам, процедурам и методам измерения уровней подводного звукового давления, излучаемого надводными судами. Для измерений не требуется использование специальных полигонов, однако условия измерений в открытом море оговорены. Схема расположения гидрофонов относительно испытуемого корабля показана на рис. 1. Гидрофоны в требуемых местах можно установить с вспомогательного судна, используя специальное устройство подвеса, изолирующее гидрофон от качки судна, либо с помощью притопленного буя, закоренного на дне, либо с помощью буя, плавающего на поверхности – см. рис. 2. Уровень подводного звукового давления измеряют в дальнем поле, затем приводят к стандартной дистанции 1 м. Рекомендованы форматы представления результатов измерения. Однако стандарт не предлагает каких-либо критериев для оценки уровня шумоизлучения судна.

В этом стандарте представлена таблица с основными параметрами измерений в зависимости от назначения и требуемой точности измерений, разбитых на три уровня: Grade A – точный метод, Grade B – инженерный метод и Grade C – оценочный метод.

Наиболее характерные данные и требования к таким измерениям представлены в табл. 1. Наиболее интересными для нас, как метрологов, являются требования к точности и повторяемости результатов измерений, так как эти данные основаны на мнении достаточно представительного сообщества американских гидроакустиков. Неопределенность результата измерения уровня шума одним гидрофоном, откалиброванным с неопределенностью 0,5 дБ, с усреднением по требуемому числу проходов составляет около 2 дБ, а усреднение данных по трем гидрофонам снижает эту неопределенность до 1,5 дБ (для измерений уровня А, в котором максимально снижены составляющие систематической погрешности). По мнению американских экспертов, это типичные значения, характерные для морских акустических измерений, и именно поэтому они регламентированы стандартом ANSI S12.64.

Альманах современной метрологии, 2015, №5

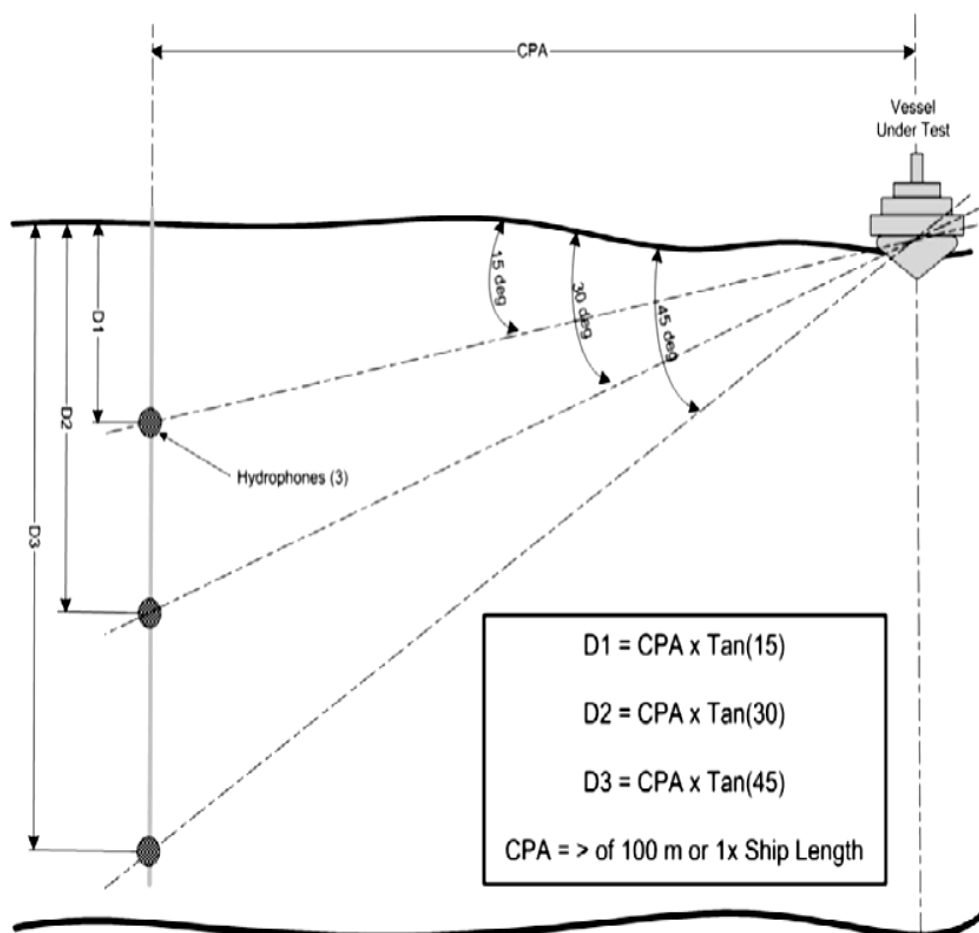


Рис. 1. Схема расположения гидрофонов относительно испытываемого судна для уровней точности А и В [3]
 CPA – минимальное расстояние до проходящего судна; D1, D2 и D3 – глубина расположения гидрофонов

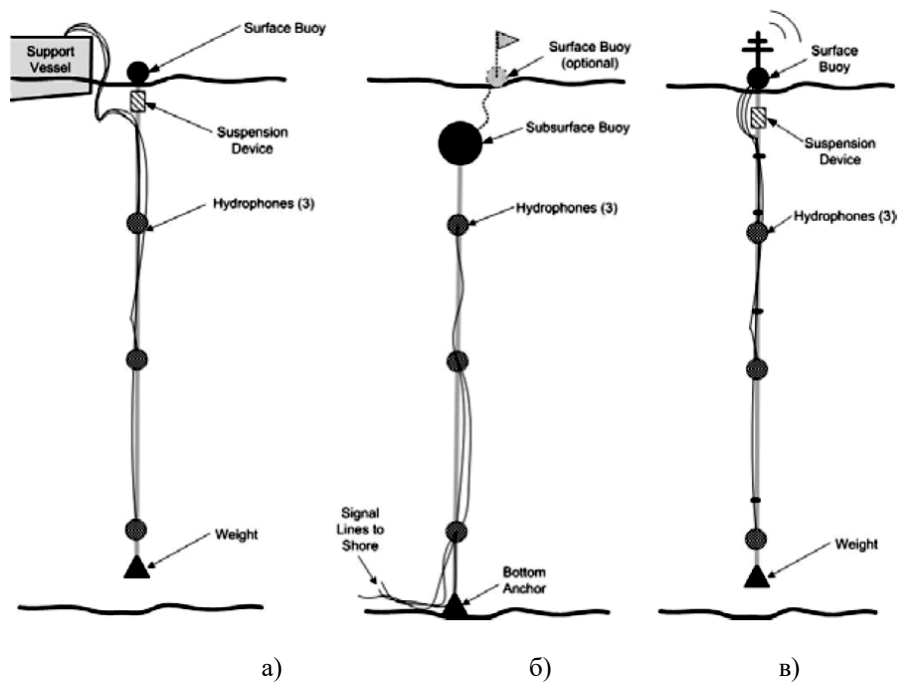


Рис. 2. Рекомендуемые [3] схемы постановки гидрофонов

а) с вспомогательного судна; б) с помощью притопленного буя, закрепленного на дне; в) с помощью буя, плавающего на поверхности

На схеме обозначены: Support Vessel – вспомогательное судно; Surface Buoy – буй, плавающий на поверхности; Suspension Device – устройство подвеса; Hydrophones – гидрофоны; Weight – груз; Subsurface buoy – притопленный буй; Signal Lines Shore – сигнальная линия на береговую станцию; Bottom Anchor – донный якорь

Таблица 1

Условия измерений подводного шума кораблей в зависимости от требуемой точности, ранжированной по уровням А, В и С [3]

Уровень	А	В	С
Название уровня	Точный метод	Инженерный метод	Оценочный метод
Неопределенность результата	1,5 дБ	3 дБ	4 дБ
Повторяемость результатов	$\pm 1,0$ дБ	$\pm 2,0$ дБ	$\pm 3,0$ дБ
Ширина полосы	1/3-октава		
Частотный диапазон	10 – 50 000 Гц	20 – 25 000 Гц	50 – 10 000 Гц
Узкополосные измерения	Требуются	Требуются	При необходимости

Продолжение таблицы 1

Кол-во гидрофонов	3 на разных глубинах		1
Глубина расположения гидрофонов (по углу между поверхностью и направлением на акустический центр)	15°, 30° и 45°	15°, 30° и 45°	20° ± 5°
Угловое окно отчета результатов	± 30° относительно ближайшей точки прохода		
Глубина моря	Более 300 м или 3-х длин судна	Более 150 м или 1,5 длины судна	Более 75 м или длины судна
Минимальная дистанция до ближайшей точки прохода	Более 100 м или длины судна		
Положение акустического центра	Определяется при испытаниях	Посередине между двигателем и винтом	
Минимальное число проходов	6	4	4

Отметим также, что подобный метод измерения для мелководья (глубина места > 30 м, измерительная дистанция от 50 до 75 м, неопределенность результата измерений 3 дБ) стандартизован в КНР еще в 2000 г. [4].

Второй попыткой выпуска международного стандарта, направленного на защиту морской экосистемы от подводного шума, является проект ISO/DIS 16554.2 [5], разработанный ISO/TC8 (судовые и морские технологии) в подкомитете SC2 (защита морской среды обитания). Этот проект был разработан по запросу Международной морской организации (IMO - International Maritime Organisation) и ее Комитета по защите морской окружающей среды (MEPC) в качестве международного стандарта для измерения подводного звука, излучаемого коммерческими судами, принимая во внимание, что воздействие подводного шума, излучаемого коммерческими судами, на морскую экосистему подлежит научному исследованию. Научные исследования воздействия подводного звука на морскую среду обитания обеспечат накопление реальных данных, которые можно было бы получить измерениями в морских условиях, например, научно-исследовательскими институтами, использующими унифицированную методологию измерений. В стандарте предлагается упрощенная методика измерений, компилированная из особенностей Grade B и Grade C американского стандарта, в диапазоне частот

от 20 Гц до 20 кГц с глубиной постановки одиночного гидрофона не менее 20 м. В стандарте нет никаких указаний о погрешности или неопределенности измерений, проводимых по рекомендованной методике. Разработка этого стандарта была доведена до стадии FDIS, на которой, по процедуре ISO и IEC, принимаются замечания только редакционного характера, однако существенные недостатки этого проекта, связанные с неоднозначностью предлагаемой методики, вызвали многочисленные возражения гидроакустиков. В настоящее время проект возвращен на предыдущую стадию (DC) для его переработки совместно с экспертами из подкомитета ISO/TC43 SC3 (гидроакустика). Полагаем, что при переработке ISO/PAS 17208-1 и ISO/DIS 16554.2 будут учтены комментарии экспертов – членов рабочих групп WG1 (подводный шум кораблей), WG2 (терминология) и WG3 (шум при забивке свай в морское дно) этого подкомитета, уточняющие бюджет неопределенностей при измерении подводного шума кораблей в зависимости от условий измерения, характеристик измерительных систем и частотных диапазонов.

Влияние подводного шума кораблей на морскую фауну и обоснование предельных норм шумоизлучения гражданских судов

С 70-х годов прошлого века наблюдается все возрастающий интерес к влиянию подводных шумов антропогенного происхождения на морскую фауну и, прежде всего, рыб и млекопитающих. Исследования показывают, что за последние 40 лет подводный шум на частотах от 10 до 50 Гц в прибрежных зонах Мирового океана возрос в среднем на 10 – 12 дБ [6], а на морских трассах – на 10 дБ только за последнее десятилетие [7]. Вредоносное воздействие подводного шума на морскую фауну может проявляться не только в виде изменения поведения морских обитателей, но и как непосредственная угроза их жизни. Широко известны экстремальные случаи фатального воздействия подводных акустических сигналов на морских млекопитающих: например, выброс китов на берег в результате воздействия на них мощных сигналов гидролокаторов военно-морских судов [8].

Уровни излучаемого судном подводного шума зависят от его типа (назначения), размеров, загрузки, скорости хода, конструкции и режима работы механизмов (главного двигателя, винтов, вспомогательного оборудования) и существенно различаются. На рис. 3 показаны типичные частотные зависимости уровня подводного шума судов различного назначения [9].

Из этого рисунка видно, что наиболее шумными оказываются ледоколы в процессе разрушения ледового покрова. Если учесть, что эти суда работают в полярных водах, отличающихся низким уровнем окружающих шумов, то приходится согласиться, что их шумовое воздействие на очень уязвимую полярную фауну (китов, тюленей, белых медведей и др.) может вызывать серьезные последствия. Большим уровнем шумов отличаются и крупнотон-

нажные суда, такие как танкеры и контейнеровозы (синяя ломаная линия на рис. 3). Морские районы с наиболее плотным расположением трасс, по которым курсируют подобные суда, испытывают известные проблемы с постоянным сокращением популяции морских обитателей этих зон.

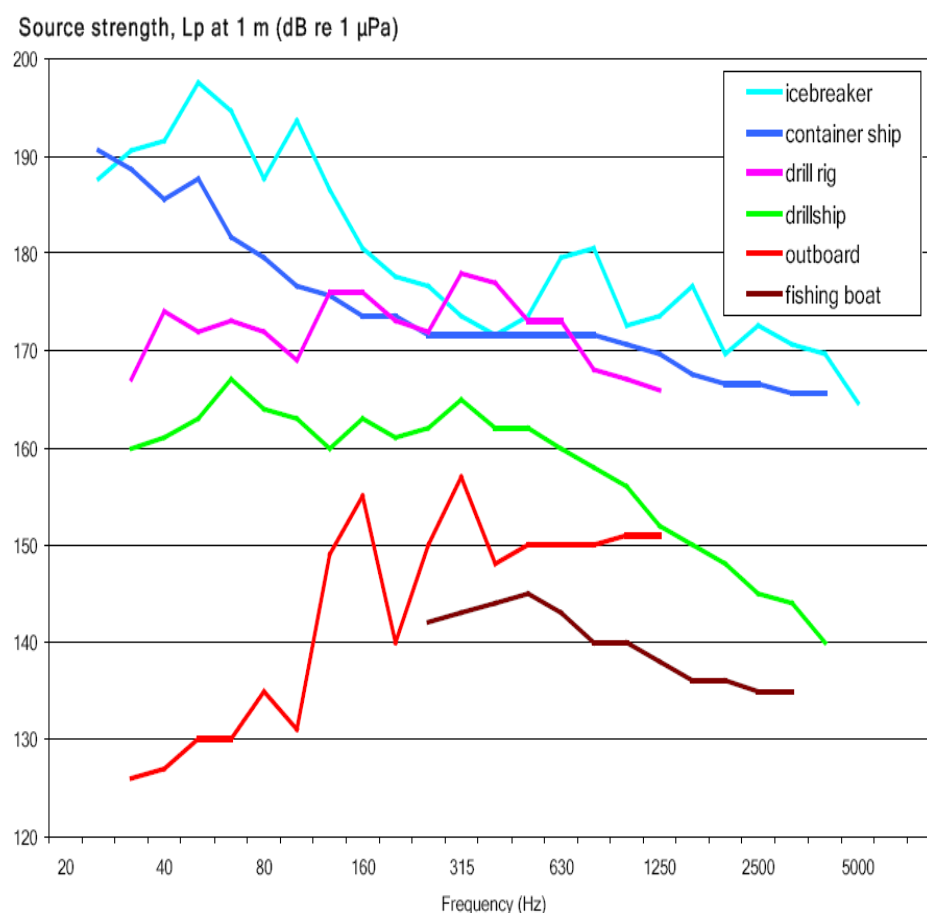


Рис. 3. Подводный шум надводных судов различного назначения [9]
Icebreaker – ледокол, container ship – контейнеровоз, drill rig – буровая платформа, drillship – судно для бурения, outboard – забортное оборудование, fishing boat – рыболовное судно

Наименее шумными в гражданском флоте должны быть рыболовные и рыбопоисковые суда, для того чтобы не отпугивать своим присутствием искомые или вылавливаемые косяки рыб. Именно для этих судов уже обоснованы предельные нормы шумоизлучения. Такое обоснование выработано в результате анализа многочисленных исследований (более 100 публикаций)

источников подводного шума, создаваемого рыбопоисковыми судами, и реакции различных рыбных популяций на шумовые воздействия. Итогом этой работы стал выпуск в 1995 г. Объединенного научно-исследовательского отчета ICES CRR 209 Международного совета по исследованию морей (ICES – International Council for the Exploration of the Sea) [10]. Этот отчет стал важной вехой в развитии гражданского судостроения с точки зрения снижения шумности надводного флота, а обоснованные в нем предельные нормы шумоизлучения для рыбопоисковых судов были неукоснительно приняты мировым сообществом. Приведем некоторые данные из этого отчета.

По результатам многочисленных исследований были выявлены пороги слышимости рыб разных семейств (пород), представленные на рис. 4 в зависимости от частоты.

Выяснилось, что наиболее распространенные породы рыб (треска, сельдь и им подобные) обладают остронаправленным слухом в частотном диапазоне от 0,1 Гц до 1,2 кГц. Причем для большинства пород максимальная слуховая чувствительность лежит в диапазоне от 20 до 300 Гц, хотя у некоторых пород она может простираться и выше 10 кГц. Максимальное слуховое восприятие соответствует 75 дБ относительно 1 мкПа на частотах от 20 Гц до 1,2 кГц. Треска обладает такой чувствительностью в диапазоне частот от 100 до 300 Гц. Слуховая чувствительность увеличивается с размером рыбы (одной и той же породы) из-за влияния плавательного пузыря, переизлучающего звуковые волны на слуховой аппарат рыбы. Со всей определенностью было выявлено, что рыба начинает уходить от шумящего судна, когда уровень излучаемого им шума будет превышать порог ее слышимости более чем на 30 дБ. Эта реакция соответствует дистанции от 100 до 200 м для большинства рыбопоисковых судов (постройки до 1995 г.), а для слишком шумных – 400 м. Следует иметь в виду, что в режиме ловли (буксировки трала) уровень подводного шума судна повышается на 5–15 дБ, что снижает возможности захвата рыбы.

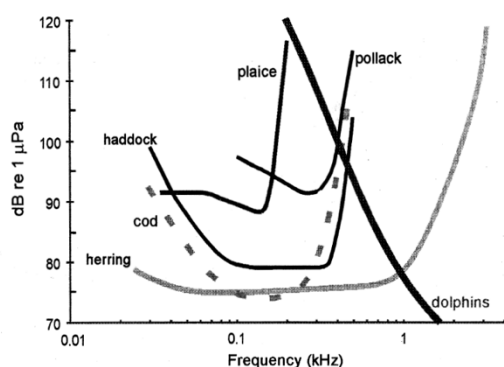


Рис. 4. Пороги слышимости рыб и морских животных в зависимости от частоты [10]

Haddock – пикша; cod – треска;
herring – сельдь; plaice – камбала;
pollack – сайда; dolphins – дельфины

Предлагаемые в [10] требования к максимальному уровню L подводного шума (в полосах частот 1 Гц) рыбопоисковых судов при скорости их хода 11 узлов выражаются следующими неравенствами:

в диапазоне от 1 до 1000 Гц $L \leq 135 - 1,66 \log_{10} f$ дБ относ. 1 мкПа (на 1 м, f – в Гц);

в диапазоне от 1 до 100 кГц $L \leq 130 - 22 \log_{10} f$ дБ относ. 1 мкПа (на 1 м, f – в кГц).

В графическом виде эти требования представлены на рис. 5.

Выполнение этой нормы позволяет судну приблизиться к косяку рыб на расстояние до 20 м.

В [10] даны также подробные рекомендации по процедуре измерений подводного шума рыбопоисковых судов, способам снижения шумности корабля, требования к используемой измерительной аппаратуре и пр. Судостроители до сих пор пользуются этим документом, а гидроакустики при измерении подводного шума кораблей сравнивают полученные результаты с рекомендованными нормами допустимого шумоизлучения, которые установлены для защиты морских обитателей от шумового воздействия и устранения препятствий для акустического мониторинга морской среды.

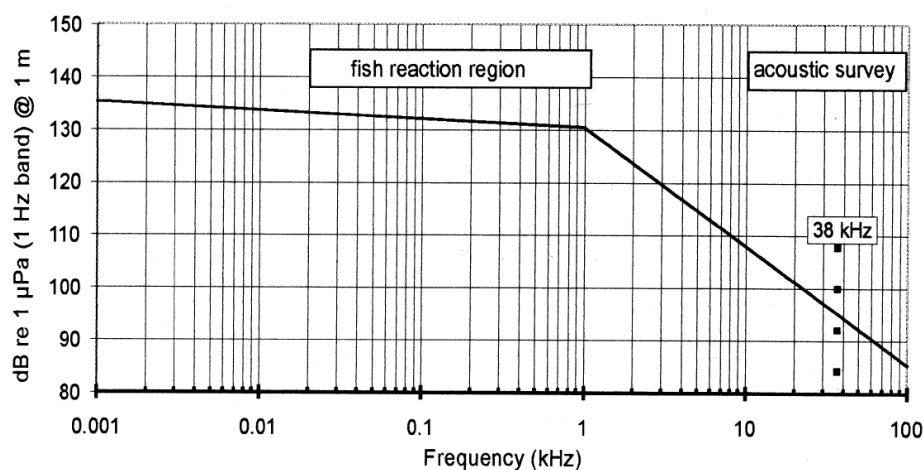


Рис. 5. Рекомендуемые ICES [10] предельные уровни подводного шума рыбопоисковых судов при движении со скоростью 11 узлов

Многочисленные исследования подтверждают, что уровень шумоизлучения научно-исследовательских и рыбопоисковых судов, построенных позже 2000 года, т.е. с учетом рекомендаций ICES CRR 209, существенно снизился. Для примера на рис. 6, взятом из [11], приведены спектральные уровни

подводного шума, излучаемого научно-исследовательскими судами “Johan Hjord” (построенного в 1990 г.), “Celtic Explorer» (построенного в 2002 г.) и “G.O. Sars” (построенного в 2003 г.) при скорости хода 11 узлов.

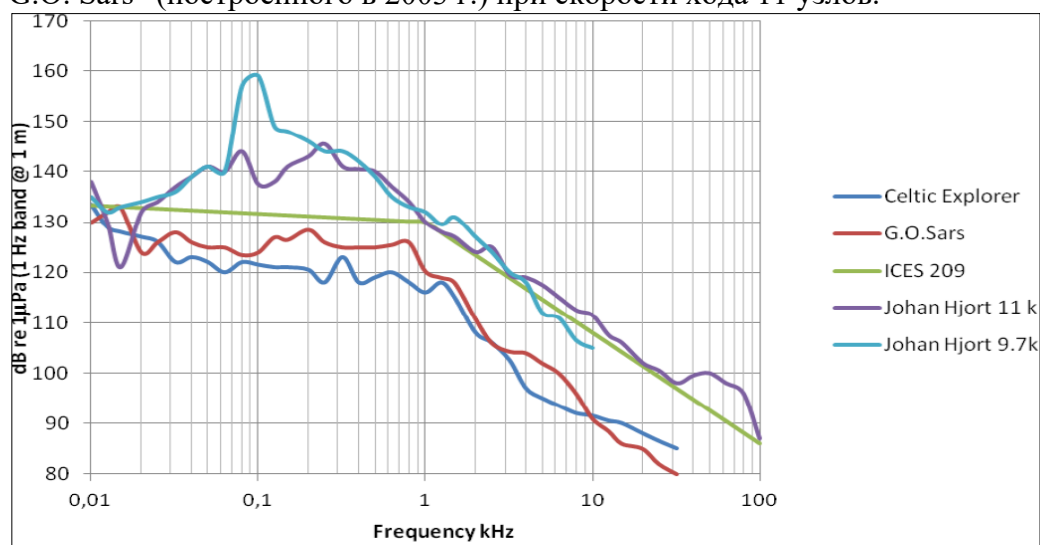


Рис. 6. Спектральные уровни подводного шума, излучаемого научно-исследовательскими судами “Johan Hjord”, “Celtic Explorer» и “G.O. Sars” [11]

Из этого рисунка видно, что наиболее значительное снижение шумоизлучения достигнуто в диапазоне частот от 30 до 500 Гц (наиболее критичном для морской фауны), что, по мнению авторов [11], связано с тем, что судостроители следовали рекомендациям ICES CRR 209 [10], оборудовав новые корабли дизель-электрической (на постоянном токе) системой привода винта и медленно вращающимся 5-лопастным винтом.

В норвежских Правилах DNV (Det Norske Veritas AS) [13] приведены нормы для классификации судов по уровню излучающего ими подводного шума. В зависимости от назначения все надводные корабли разделены на 5 типов:

тип А (Acoustic) – суда, использующие гидроакустическое оборудование как важный инструмент их функционирования, например, гидрографические суда, исследовательские суда, суда-трубоукладчики, водолазные суда, различные оффшорные вспомогательные суда, военно-морские суда и пр., к которым предъявляются требования по шуму в диапазоне частот от 1 до 100 кГц, где работают гидроакустическое оборудование и подруливающие устройства;

тип S (Seismic) – суда, выполняющие сейсмические исследования с использованием акустических сейсмоприемных кос в диапазоне частот от 3,15 до 3-5 Гц;

тип F (Fishery) – рыболовные суда, работающие в режимах поиска (рыбы)

и лова с использованием больших тралов, для которых важно минимизировать возможность ухода рыбы из района лова и обеспечить приемлемое отношение сигнал/шум для работы гидролокатора, и все это расширяет частотный диапазон требований к шуму – от 10 Гц до 100 кГц;

тип R (Research) – научно-исследовательские и рыбопоисковые суда как наиболее малошумные в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц;

тип E (Environmental) – экологические суда, в том числе круизные, имеющие возможность снижать свое шумоизлучение.

Все условия проведения измерений (режимы работы судовых механизмов и акустических устройств, загрузка судна, скорость хода, схема маневрирования, дистанция от гидрофона до тестируемого судна и пр.) в [13] строго регламентированы. Некоторые из них приведены в табл. 2.

Таблица 2

Условия проведения измерений по методике DNV [13]

Параметр	Значение
Единица измеряемой величины	дБ относ. 1 мкПа м ⁻¹
Опорное расстояние	1 м
Коэффициент поправки на дистанцию	Измеренные потери или $18 \lg (r/r=1 \text{ м})$
Установка гидрофона	В устройстве max 0,2 м над дном. Дно не плоское
Поправка на отражение от поверхности	- 5 дБ
Расстояние до СРА	150 - 250 м
Минимальная глубина под судном	30 м или $d \geq 0,64 v^2$
Точность измерения глубины и дистанции	$\pm 5 \text{ м}$
Частотный диапазон	Все требуемые 1/3-октавные полосы
Частотный анализ	В 1/3-октавах
Частотный анализ (опция)	Узкополосный
Время усреднения данных: для прямого прохода при подруливании при тяге за кнехт	При ≤ 5 узлах: длина судна / скорость При > 5 узлах: 2 длины судна / скорость 30 с 1 мин.
Сигнал/окружающий шум	$> 10 \text{ дБ}$ – не учитывают $< 10 \text{ дБ}$ – введение поправки по специальной процедуре
Min динамический диапазон измерения	90 дБ
Погодные условия	Не более 4 баллов по Бофорту/Море 3

Предельные нормы шумоизлучения - уровни звукового давления в 1/3-октавных полосах, усредненные по времени прохода CPA (Closest Point of Approach – ближайшей к гидрофону точки прохода) и приведенные к стандартной дистанции 1 м, определяют класс судна как малошумного. Эти уровни представлены в табл. 3 в эмпирическом виде, а на рис. 7 показаны ломаными линиями.

Таблица 3

Максимально допустимые уровни шумоизлучения для классификации судов различных типов как МАЛОШУМНЫХ [13]

Тип судна	Уровень шума в дБ отн. 1 мкПа/м	Частотный диапазон
A	При съемке: $156 - 12 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
A	При работе подруливающего устройства: $165 - 12 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
S	168 в каждой 1/3-октавной полосе	3,15 – 315 Гц
S	175 на весь частотный диапазон	3,15 – 315 Гц
F	Поиск рыбы: $162 - 6 \lg f$ (Гц)	10 – 100 Гц
F	Поиск рыбы: $138 + 6 \lg f$ (Гц)	100 – 1000 Гц
F	Поиск рыбы: $156 - 13,2 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
F	Траление: $178 - 8 \lg f$ (Гц)	10 – 100 Гц
F	Траление: 162 в каждой 1/3-окт. полосе	100 – 1000 Гц
F	Траление: $162 - 15 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
R	$171,8 - 22,5 \lg f$ (Гц)	10 – 25 Гц
R	$128,7 + 8,3 \lg f$ (Гц)	25 – 1000 Гц
R	$153,6 - 12 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
E	Тихий ход: $171 - 3 \lg f$ (Гц)	10 – 1000 Гц
E	Тихий ход: $162 - 12 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц
E	Переход: $183 - 5 \lg f$ (Гц)	10 – 1000 Гц
E	Переход: $168 - 12 \lg f$ (кГц)	1 – 100 кГц

Как видно из рис. 7, научно-исследовательские суда, в том числе и для рыбопоисковых работ, являются наименее шумными. Примечательно, что в Норвегии, например, измерения их шумоизлучения проводят на военноморском полигоне в Хеггенесе на острове Askøy к северо-западу от Бергена по стандарту НАТО [13], в то время как остальные гражданские суда измеряют по руководству DNV [12] или американскому стандарту ANSI S12.64-2009 [11, 14].

Нормы DNV (рис. 7) для рыбопоисковых судов совпадают с нормами

ICES CRR 209 с той лишь разницей, что DNV завысил допустимые уровни шума на частотах ниже 25 Гц. Авторитетность рекомендаций ICES CRR 209 подтверждена и тем, что рекомендуемой там скорости движения судна в процессе измерений (11 узлов) придерживаются и в других документах (например, в [13]).

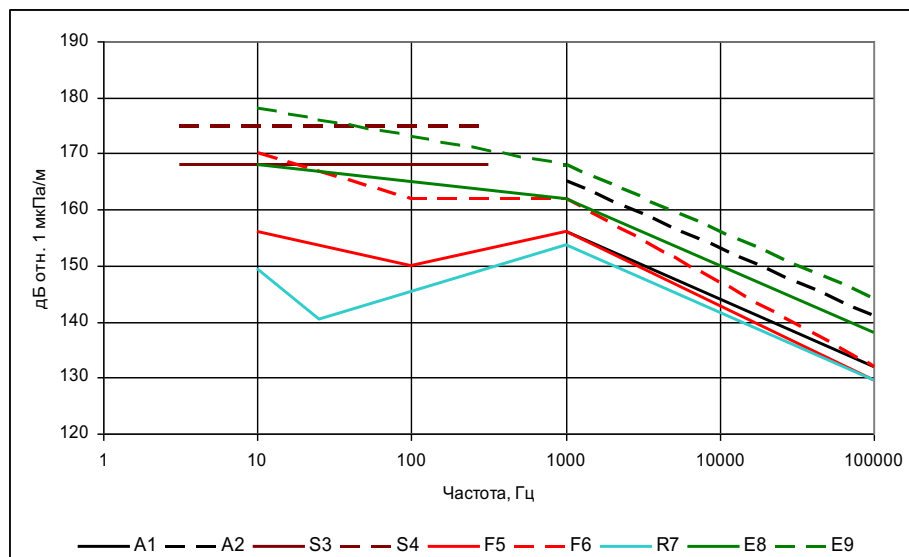


Рис. 7. Приведенные к дистанции 1 м предельные нормы шумоизлучения - уровни подводного шума в третьооктавных полосах для судов различных типов по [13]: типа А - при съемке (A1) и подруливании (A2); типа S – в 1/3-октавных полосах (S1) и во всем диапазоне (S2); типа F – при поиске (F1) и при лове (F2); типа R - (R7); типа E – на тихом ходе (E1) и на переходе (E2)

Следует отметить, что каких-либо других норм, кроме DNV [13] и ICES CRR 209, ограничивающих подводный шум судов, в международной практике не существует.

По нашему мнению, основным недостатком этих документов является отсутствие какого-либо упоминания о неопределенности измерений, обеспечиваемой предлагаемой методикой. В настоящее время во все стандарты МЭК (IEC – International Electrotechnical Commission) и ISO, регламентирующие какие-либо методики измерений, включают разделы с оценкой неопределенности результатов измерений. В современной метрологии принято, что результат измерения – это «набор значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией» [15]. Причем «как правило, результат измерения выражается одним измеренным значением величины и неопределенностью измерений. Если неопределенность измерений можно считать пренебрежимой для заданной цели измерения, то результат измерения может выражаться

Альманах современной метрологии, 2015, №5

как одно измеренное значение величины. Во многих областях это является обычным способом выражения результата измерения» (там же). Нет никаких оснований полагать, что расширенной неопределенностью измерений подводного шума, которая, как будет показано ниже, иногда достигает 3 – 6 дБ, можно пренебречь. Если в стандарте или в ином нормативном документе подробно описана методика измерений и оценены значения неопределенности их результатов, получаемых при строгом соблюдении рекомендуемой процедуры выполнения измерений, то пользователю документа (т.е. лицу, проводящему измерения), не обязательно оценивать неопределенности своих результатов самостоятельно, а можно сослаться на неопределенность, оцененную в нормативном документе. В этом случае последнюю можно считать целевой неопределенностью (target measurement uncertainty), «заранее установленной как верхний предел и принятой, исходя из предполагаемого использования результатов измерений» [15]. Таким образом, оценка неопределенности измерений, сделанная в нормативном документе для рекомендуемой там методики измерений, освобождает пользователя от утомительной процедуры составления и обоснования «бюджета неопределенности» [15], чем обычно и пренебрегают исследователи в своих отчетах о результатах измерений подводных шумов.

Оценка реальных значений неопределенности при измерении подводного шума

Рассмотрение неопределенностей результатов измерения подводного шума, излучаемого морскими судами, целесообразно начать с уточнения понятия самой измеряемой величины. В отчетах об измерениях подводного шума судов и в стандартах на такие измерения измеряемую величину часто называют как «уровень подводного звукового давления» (underwater sound pressure level, аббревиатура – SPL) [2, 3, 5], или «уровень излучаемого шума» (radiated noise level, аббревиатура – RNL) [2] – после переработки в ИСО/ТК43/ПК3, или «уровень результирующей сигнатуры источника» (resulting signature source level) [2, 3], или просто «сигнатура» [3]. В общем случае эти понятия примерно сходны, за исключением того, что термин «уровень» определяют как 20 десятичных логарифмов отношения среднего квадратичного значения звукового давления в заданной частотной полосе к его опорному значению (1 мкПа) с приведением к опорному расстоянию (1 м), а термин «сигнатура» – это описание уровней во всем частотном диапазоне измерений подводного шума, т.е. более полная акустическая характеристика источника шума.

В американском стандарте [3] установлены значения неопределенностей, которые можно обеспечить при точном соблюдении рекомендуемых там условий проведения измерений подводного шума кораблей, основные из ко-

торых приведены в табл. 1. Однако терминология, используемая в этом относительно свежем стандарте, не соответствует требованиям международных нормативных документов по метрологии, что не обеспечивает однозначного понимания приводимых в стандарте величин. Так, уже из табл. 1 не ясно, о какой неопределенности измерений идет речь: о стандартной или расширенной. Не проясняет эту неоднозначность и содержание раздела 7 «Неопределенность измерений» стандарта [3], изобилующее терминами «overall measurement uncertainty», «total standard uncertainty», «combined uncertainty» и «overall standard uncertainty» и в котором вообще отсутствует термин «расширенная неопределенность» («expanded uncertainty»). Следует вспомнить, что в последней редакции Международного словаря по метрологии [15] под термином “полная неопределенность” (overall uncertainty) иногда понимают расширенную неопределенность (взятую из раздела 5 Рекомендации INC-1 по выражению неопределенностей, принятой Международным комитетом по мерам и весам в 1980 г.), и просто “неопределенность” в документах МЭК. Поэтому употребление в стандарте [3] термина «полная стандартная неопределенность» («overall standard uncertainty») вообще лишено всякого смысла.

Само понятие неопределенности составителями стандарта [3] не понято, хотя в тексте стандарта при ссылках на точность измерения используется именно это слово (неопределенность – uncertainty), а не погрешность. Но составители стандарта так и не отошли от концепции погрешности (которую иногда называют традиционным подходом или концепцией истинного значения) к концепции неопределенности. Их позиция наглядно обозначена уже в неверном определении термина «неопределенность измерения» как максимальной разности между измеренным значением величины и ее истинным значением [3]: “measurement uncertainty - maximum difference between the measured resulting signature source level and the true signature source level stated in decibels for a given measurement system, for one-third octave bands using a given measurement method (averaging time, bandwidth-time product, etc.)”.

Следует напомнить, что в соответствии с [15] «неопределенность измерений – это неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании используемой информации»

К сожалению, та же терминология дословно воспроизведена и в международной спецификации ИСО [2].

Как уже упоминалось выше, если в стандарте подробно изложены условия измерений, процедура их проведения и методы обработки результатов, то при соблюдении этих требований должна быть обеспечена точность измерений, оцененная в стандарте в виде неопределенности конечного резуль-

тата – в данном случае уровня подводного шума корабля в заданных частотных полосах (обычно в 1/3-октавных) в заданном частотном диапазоне и приведенных к опорному расстоянию (обычно 1 м). Таким образом, оценку неопределенности результатов измерения подводного шума корабля, приведенную в нормативном документе на методику измерений, по современной терминологии [15] можно рассматривать как «целевую неопределенность (target uncertainty), заранее установленную как верхний предел и принятую, исходя из предполагаемого использования результатов измерений».

Интересно оценить реальные расхождения результатов измерений подводного шума корабля, полученных по одной и той же методике, но на разных полигонах и различными средствами измерения, т.е. воспроизводимость результатов измерений. Напомним, что в соответствии с [15] **воспроизводимость** (reproducibility) реализуется «в условиях измерений, включающих разные местоположения, разные измерительные системы, участие разных операторов и выполнение повторных измерений на одном и том же или подобных объектах». Если вариации условий измерений ограничены «применением одной и той же методики измерений, той же измерительной системы, участием тех же операторов, теми же рабочими условиями, тем же местоположением и выполнением повторных измерений на одном и том же или подобных объектах в течение короткого промежутка времени», то речь идет о **повторяемости** (repeatability) измерений [15]. И в этой связи необходимо отметить еще одно противоречие в американском стандарте [3], определяющем **повторяемость** измерений (measurement repeatability) как «ожидаемое различие между уровнями результирующей сигнатуры источника в дБ и в третьоктавных полосах при измерениях одного и того же испытуемого объекта в различное время при одних и тех же условиях и одними и теми же методами» (expected difference between resulting signature source levels, stated in decibels, in one-third octave bands, taken at different times, given that the same vessel under test, conditions, and measurement methods are used). Эти условия не ограничиваются указаниями одного и того же места (полигона, стенда), одной и той же измерительной аппаратуры, одного и того же состава операторов или промежутка времени, т.е. полностью соответствуют условиям воспроизводимости, а не повторяемости измерений [15]. При интерпретации положений стандарта [3] это противоречие необходимо учитывать, особенно при вычислении стандартной неопределенности по типу А.

В отчете ICES CRR 209 [10] дан пример оптимистичной оценки точности измерений с очень малыми (1 дБ) расхождениями результатов измерений подводного шума корабля, построенного в Норвегии и там же измеренного на военном полигоне, а затем перегнанного в Новую Зеландию и вновь измеренного на новом полигоне. Но это свидетельство о высокой **воспроизводимости** результатов измерений не кажется достаточно достоверным из-за

отсутствия конкретных данных по шумам во всем измеренном диапазоне частот, а также указания конкретных условий проведения измерений на обоих полигонах.

Для практической проверки достоверности оценки заявленной неопределенности измерений у метрологов имеется один неоспоримый метод – проведение **сличений**. Такие исследовательские проекты с целью сравнения результатов измерений подводного шума одного и того же корабля при его движении в одном и том же режиме на различных измерительных полигонах состоялись. В 2011 году в рамках исследовательского проекта НАТО RIMPASS были выполнены измерения двух малозумных научно-исследовательских судов QUEST (ВМФ Канады) и PLANET (ВМФ Германии) на полигонах Loch Fyne (Великобритания), в Heggernes (Норвегия), в Aschau (Германия) и в Бресте (Франция) [16, 17]. Для сравнения использовали одинаковые режимы прохода кораблей и работы их механизмов. Чтобы обеспечить приемлемое отношение сигнал/помеха на полигонах с высоким уровнем помех окружающей среды, двухкорпусное исследовательское судно PLANET (рис. 8) было оборудовано тремя виброакустическими излучателями, установленными внутри одного из корпусов на его днище, что позволяло излучать в воду достаточно мощные и хорошо воспроизводимые тональные импульсы в диапазоне частот от 16 Гц до 13 кГц, а также буксируемой за судном (на расстоянии 80 м от него) и подвешенной за поплавок рамой с тремя разными гидроакустическими излучателями, обеспечивающими достаточно высокий уровень излучения на частотах от 20 Гц до 63 кГц. Стабильность излучения вибраторов контролировали установленными вблизи них вибродатчиками, а гидроакустических излучателей – с помощью контрольного гидрофона, расположенного на той же раме, что и излучатели (рис. 9).



Рис. 8. Двухкорпусное научно-исследовательское судно PLANET (German Navy). Фото из [18]

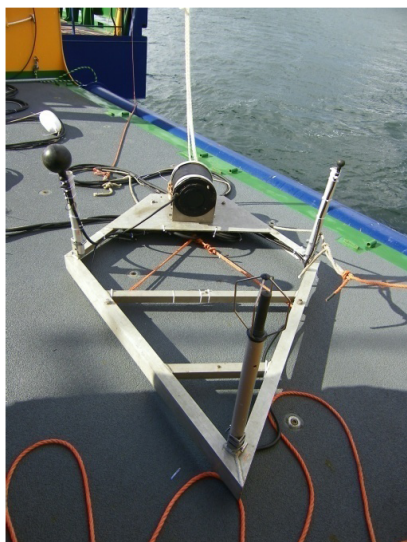


Рис. 9. Три излучателя и контрольный гидрофон на раме для буксировки [16]

Программа исследований, в которых принимали участие несколько групп экспертов из разных стран, предусматривала:

- 1) оценку повторяемости измерений подводного шума корабля (на одном и том же стенде при нескольких проходах в одном и том же режиме);
- 2) оценку различий в сигнатурах подводного шума корабля, полученных на различных полигонах, и выявление причин таких различий;
- 3) сравнение результатов измерения на мелководных и глубоководных полигонах.

При этом измерения проводились как в траверзных направлениях (в соответствии с [3] и [13]), так и под килем (в соответствии с [13]).

По мнению одного из участников этих исследований [17], источниками ожидаемого различия в результатах измерений на разных полигонах могут быть:

- принятые допущения о модели распространения подводного звука (глубина моря, глубина расположения гидрофонов, акустические свойства воды и морского дна);
- расстояние между гидрофоном и судном (ближнее или дальнее поле), ориентация судна относительно гидрофона и допущение о круговой направленности источника;
- временные включения-отключения некоторых механизмов корабля, работающих в автоматическом режиме;
- зависимость порога кавитации от состава воды, подводных течений и загрузки судна;
- особенности измерительной системы и расположения гидрофонов

относительно линии измерительного галса;

- особенности обработки результатов, точность системы слежения, точность калибровки гидрофонов.

Влияние некоторых из этих источников рассмотрено ниже.

На рис. 10 показаны результаты измерений уровней подводного шума (в 1/3-октавных полосах) судна PLANET с буксируемыми работающими излучателями при различных скоростях хода судна. Из рисунка видно, что на частотах от 16 до 125 Гц расхождение результатов достигает до 20 дБ, а на более высоких частотах пренебрежимо мало. Авторы [16] объясняют этот феномен изменением глубины рамы (а значит, и условий отражений излучаемого сигнала от поверхности) при ее буксировке на различных скоростях (от 3 до 5,5 узлов). Неудовлетворительными оказались и результаты сравнения на частотах ниже 16 Гц, что, по-видимому, связано с мелководьем на полигоне Aschau. Тем не менее, такой источник можно использовать для оценки **условий воспроизводимости** результатов измерения шума на различных полигонах при движении буксируемых излучателей с одной и той же скоростью.

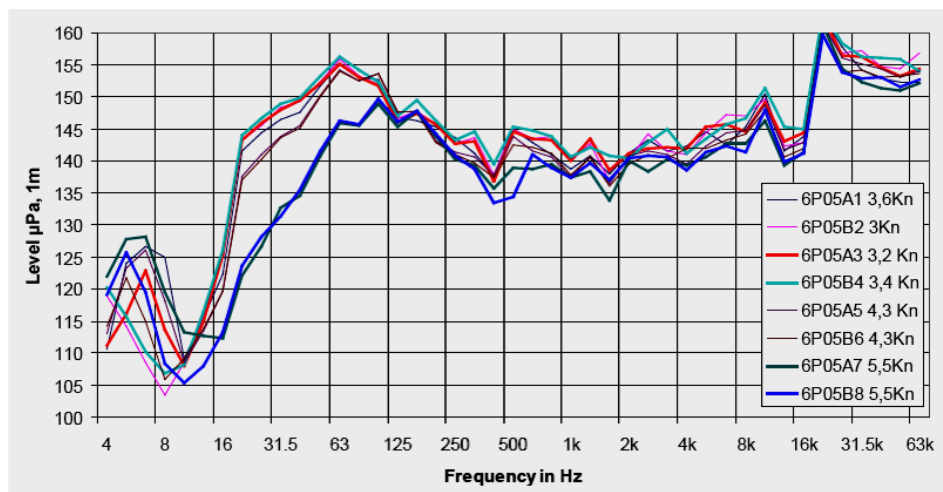


Рис. 10. Результаты измерения уровней подводного шума (в 1/3-октавных полосах) судна PLANET с буксируемыми излучателями при различных скоростях хода [16]

На рис. 11 показаны результаты измерений подводного шума (в полосах 16 Гц) судна PLANET с работающими вибраторами (для 4-х галсов). На первый взгляд, эти данные демонстрируют хорошее совпадение (повторяемость), однако при более подробном рассмотрении выясняется, что уровни на отдельных дискретах разнятся на 5 дБ и более, и это, по мнению авторов [16], существенно превышает отклонения, регистрируемые вибродатчиками, установленными вблизи вибраторов, что, по их мнению, обусловлено несим-

метричностью расположения вибраторов относительно оси судна.

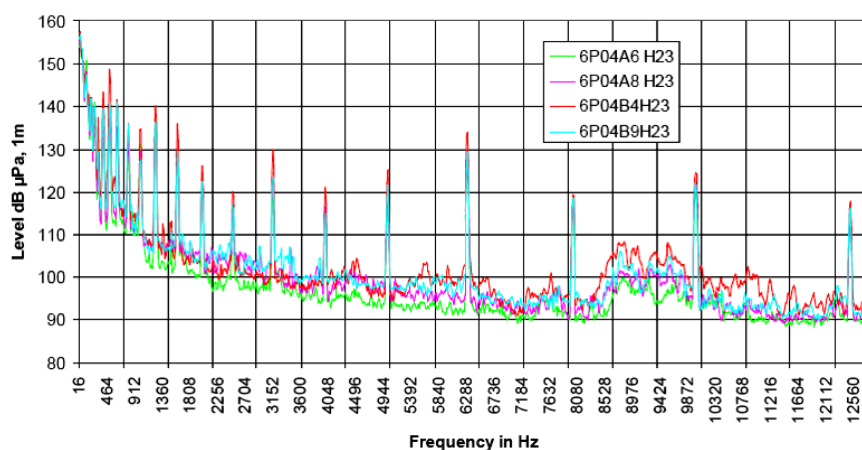


Рис. 11. Результаты измерений узкополосных (16 Гц) уровней подводного шума судна PLANET с работающими вибраторами (4 галса) [16]

Наиболее интересны эксперименты по оценке повторяемости измерений подводного шума самого судна. На рис. 12 показаны результаты таких экспериментов (уровней в 1/3 октавных полосах) для 6 проходов (галсов) под килем судна PLANET, проходящего над одним и тем же гидрофоном со скоростью 6 узлов на стенде 2 в Aschau [16]. Вероятно, немецкая пунктуальность позволила достаточно строго реализовать **условия повторяемости измерений** (см. выше), результатом чего стал достаточно малый разброс данных во всем частотном диапазоне.

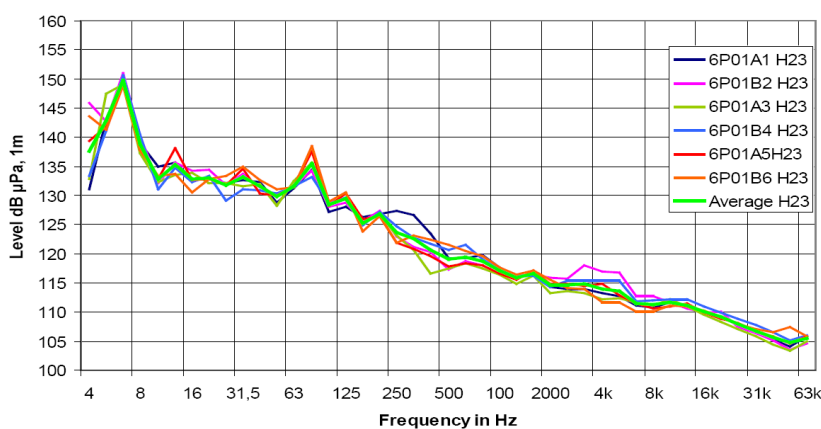


Рис. 12. Результаты измерений подводного шума под килем PLANET на стенде H23 в Aschau (6 галсов)

Авторы [16] считают, что судно само по себе (без дополнительных излучателей) проявило себя как референтный источник, в некоторых случаях даже более стабильный, чем вибраторы на борту или буксируемые излучатели. К сожалению, авторы [16] не опубликовали данных о дисперсии отклонений в каждой частотной полосе, по которой можно было бы судить о стандартной неопределенности (по типу А) этих измерений и сравнить ее с показателями неопределенности в выпущенных или разрабатываемых стандартах на измерения подводного шума. Авторы настоящей статьи восполнили этот недостаток, вычислив показатели повторяемости (СКО результата наблюдений) и стандартную неопределенность (по типу А) усредненных по 6 галсам уровней (СКО результата усреднения) по представленным в [16] и на рис. 12 графическим материалам. Результаты этих вычислений показаны на рис. 13.

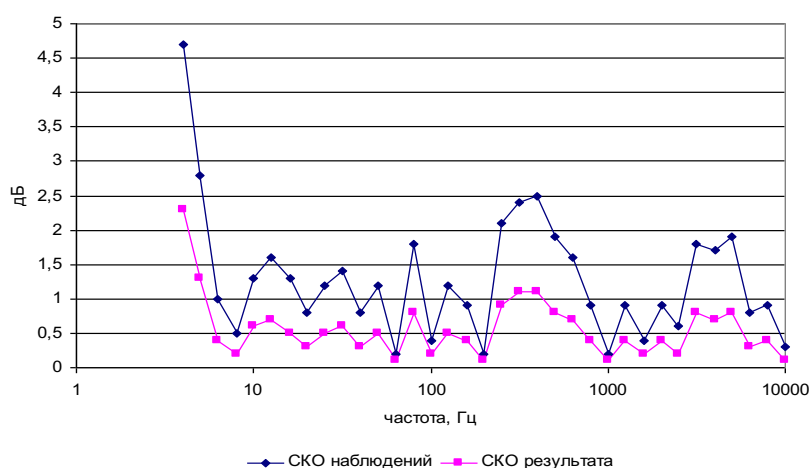


Рис. 13. Средние квадратичные отклонения результатов наблюдений и усредненного (по 6 галсам) результата измерения подводного шума судна PLANET при оценке повторяемости измерений на полигоне Aschau

Усредненное в диапазоне частот от 6,3 Гц до 10 кГц СКО наблюдений, характеризующее повторяемость результатов от галса к галсу, составляет 1,1 дБ, а усредненное СКО результирующего среднего, характеризующее стандартную неопределенность (по типу А) измерения уровней подводного шума в этом частотном диапазоне, составляет 0,5 дБ. Но все это относится к повторяемости результатов измерений, а не к их воспроизводимости.

Оценка повторяемости результатов измерений является одной из основных забот персонала каждого измерительного полигона. Именно по этой оценке обосновывают число зачетных галсов измеряемого судна. На наш взгляд, такой подход к регламентации методики измерений, при котором устанавливают допустимое значение СКО результата и одновременно назна-

чают требуемое число наблюдений, т.е. проходов судна, (например, 4 или 6, как в [3]), не всегда возможен на практике. Логичнее установить предельное значение СКО, а проходы выполнять столько раз, сколько это необходимо, чтобы обеспечивать требования к предельному значению СКО. И при этом засчитывать только те проходы (галсы), которые соответствовали заранее оговоренным условиям измерений.

В Aschau (Германия) проводились подобные эксперименты и с другими судами. На рис. 14 показаны результаты (в относительных единицах) исследований повторяемости результатов измерений подводного шума небольшого судна (длина 25 м, водоизмещение 98 т) при его движении со скоростью 9,4 узла в одном и том же направлении и при соблюдении одинаковых режимов работы всех механизмов [17]. На рисунке показаны наиболее сходные результаты измерения по трем галсам. Нижняя синяя ломаная линия показывает разность между максимальным и минимальным значениями уровней (в 1/3-октавных полосах) для отдельных галсов. На частотах выше 31,5 Гц эта разность не превышает 3 дБ. Автор [17] полагает, что существенное расхождение (до 7 дБ - больше ожидаемого) результатов на частотах ниже 31,5 Гц связано с измерениями в ближнем поле. На наш взгляд, такая оценка повторяемости, с выявлением максимальных разбросов, а не дисперсии результатов наблюдений, не представляется достаточно убедительной, тем более, что автор [17] указывает, что «остальные галсы с большим расхождением не были засчитаны». Но какой-то иной статистической обработки результатов измерений только по трем галсам, к тому же выбранным по приемлемой сходимости, провести и нельзя. Ценность такого эксперимента крайне низка.

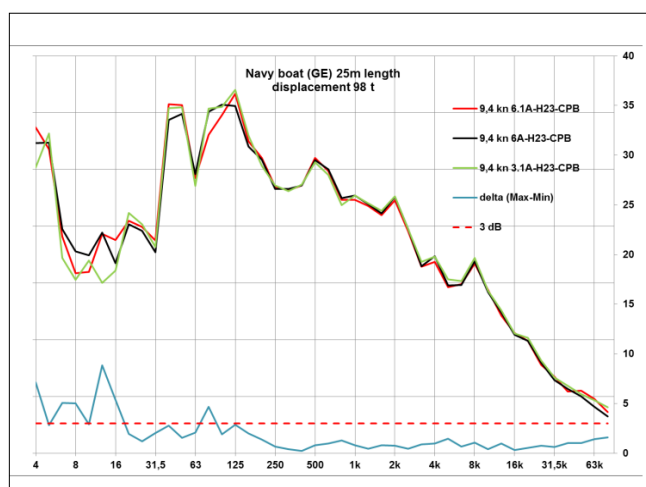


Рис. 14. Оценка повторяемости результатов измерений подводного шума на мелководном полигоне в Aschau (Германия) [17]

Существенно важной представляется оценка воспроизводимости результатов измерений по одной и той же методике, но на разных полигонах, использующих различные измерительные системы, расположение гидрофонов, глубину места и акустические характеристики морского дна. На рис. 15 представлены усредненные (по используемым гидрофонам, по количеству проходов) результаты измерений подводного шума (в 1/3-октавных полосах и относительных единицах) корабля, проходящего над гидрофоном (KEEL aspect) на скорости 6 узлов, на различных полигонах [17]. По оси ординат отложены усредненные уровни в относительных единицах. По мнению автора [17], на частотах выше 100 Гц совпадение результатов было удовлетворительным (максимальная разность не превышает 3 дБ), тогда как на более низких частотах несовпадения достигают 10 – 15 дБ, хотя измерения выполнялись по стандартным рекомендациям [3] и [13]. Из рисунка видно также, что результаты измерений на двух стендах полигона Aschau на частотах ниже 6 Гц значительно отличаются друг от друга из-за различий в характеристиках морского дна: один из стендов установлен на песчаном дне, а другой – на илстом.

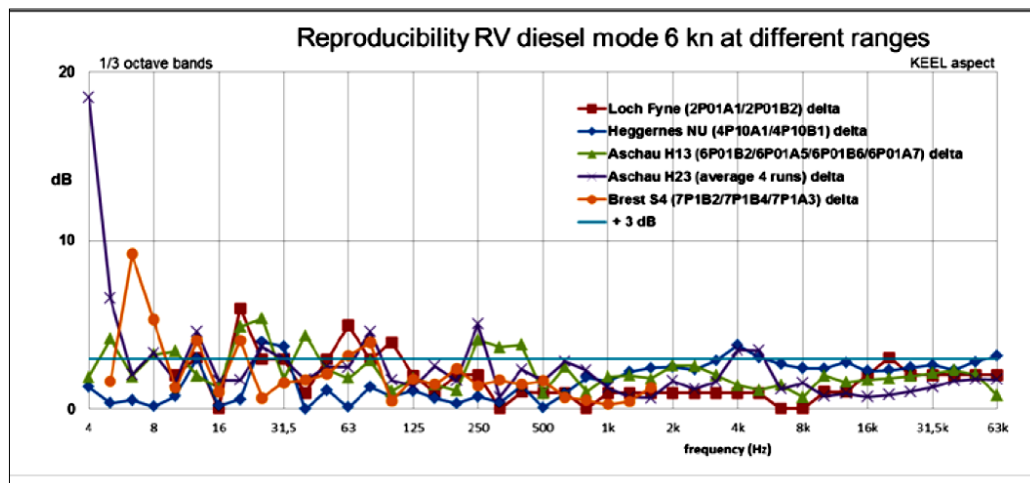


Рис. 15. Воспроизводимость результатов измерений подводного шума судна, движущегося со скоростью 6 узлов на разных полигонах: в Loch Pyne, Heggernes, Aschau (2 стенда) и Brest [17]

При анализе этих данных автор [17] обращал внимание только на максимальные разбросы результатов (от полигона к полигону), а следовало бы оценить средние квадратичные отклонения результатов измерений на каждой частоте, что стало бы более объективной оценкой воспроизводимости измерений по используемой методике на разных полигонах. Авторам настоящей статьи пришлось выполнить расчет СКО по данным, графически

представленным на рис. 15. Такая обработка тем более уместна, что из рис. 15 видно, что разброс ломаных кривых совершенно случаен и не связан с каким-либо систематическим отклонением. Результаты расчета показаны на рис. 16.

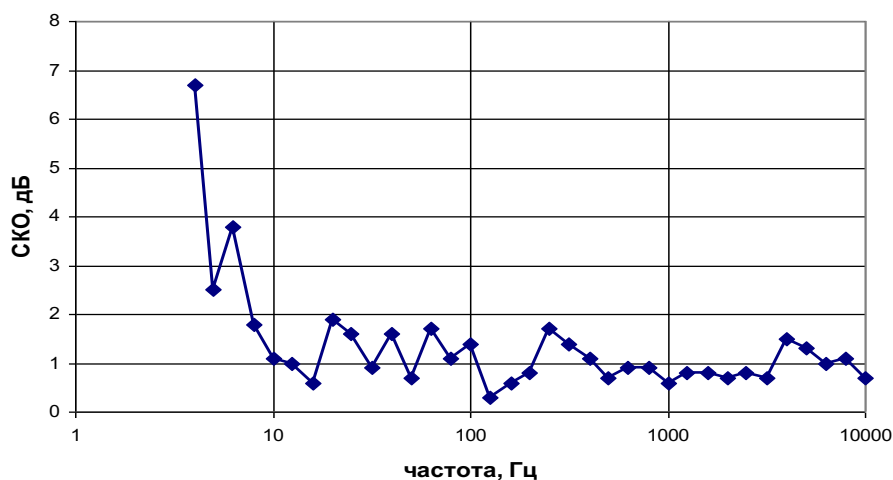


Рис. 16. Оценка воспроизводимости результатов измерений подводного шума судна на разных полигонах – обработка данных рис. 15

Из этого рисунка видно, что дисперсия разбросов результатов измерений подводного шума корабля, проведенных по стандартной методике на разных полигонах, в диапазоне часто выше 8 Гц не превышает 2 дБ. На наш взгляд, это достаточно реалистичное значение, но, с учетом того, что это все-таки стандартное отклонение, а не расширенная неопределенность (при доверительной вероятности 95 %), вызывает сомнение обоснованности точностных характеристик американского стандарта [3] (см. табл. 1).

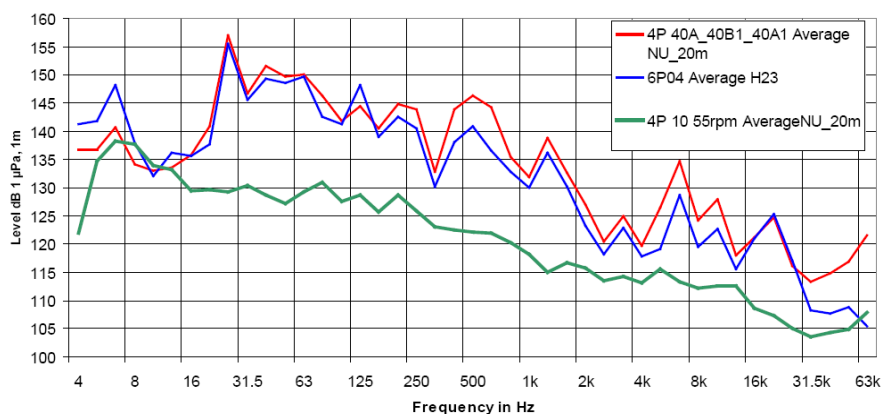


Рис. 17. 1/3-октавные уровни шума, измеряемые гидрофоном под килем PLANET с работающими вибраторами [16]: на полигоне Heggernes – красная линия, в Aschau – синяя линия. Зеленая линия обозначает шумы судна с выключенными вибраторами

С помощью судна PLANET немецкие специалисты подробно исследовали причины различия результатов измерений на мелководном полигоне в немецком Aschau и на глубоководном полигоне в норвежском Heggernes [16]. Эксперименты с использованием вибраторов, установленных на борту PLANET, показали устойчивое и труднообъяснимое завышение результатов, полученных на полигоне в Heggernes, на частотах выше 31,5 Гц. На рис. 17 показаны результаты этого эксперимента в виде усредненных по нескольким галсам 1/3-октавных уровней шума, измеряемого гидрофоном, находящимся под килем проходящего судна и установленным на глубине 20 м.

Эксперименты с буксируемыми излучателями показали меньшее расхождение на частотах выше 20 Гц. На рис. 18 показаны результаты измерения 1/3-октавных уровней (усредненных по нескольким галсам) шума излучателей на полигоне Heggernes – черная линия, в Aschau – синяя линия с помощью гидрофонов, установленных под килем проходящего (со скоростью 3 узла) судна на глубине 20 м. Красная линия соответствует измерениям с гидрофона в Heggernes, установленного на глубине 55 м.

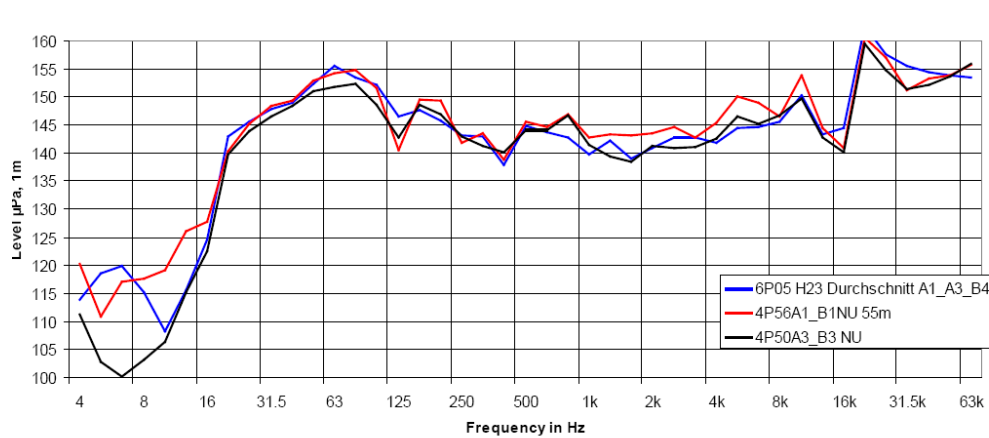


Рис. 18. Сравнение результатов измерения шума буксируемых излучателей на полигонах Heggernes (черная линия) и Aschau (синяя линия) [16]

Эксперименты, результаты которых представлены на рис. 17 и 18, были, по сути дела, проверкой методов, которыми можно сравнивать условия воспроизводимости измерений на двух разных полигонах. И эта проверка показала, что наиболее точно условия воспроизводимости можно оценить при использовании буксируемых излучателей, излучаемый шум которых существенно выше шума судна-буксировщика.

Тем не менее, наиболее интересно сравнить результаты измерений подводного шума, излучаемого самим судном, на обоих полигонах. Такие эксперименты были проведены на обоих полигонах при нахождении гидрофона (на глубине 20 м) как под килем проходящего судна, так и в

траверсном направлении [16]. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 19 и 21 в виде 1/3 октавных уровней подводного шума, усредненных по нескольким галсам. Измерения в Aschau проводили на двух стендах с совершенно различными характеристиками морского дна: на стенде 2 – оно было песчаное, а на стенде 1 – илистое и насыщенное газами. Именно этим авторы [16] объясняют причины различия в низкочастотных уровнях, измеряемых на стендах в Aschau. При анализе этих результатов будем учитывать только измерения на стенде 2 полигона Aschau и на полигоне Heggernes. Построим частотную зависимость разности уровней шума, измеренных в Aschau (стенд 2) и Heggernes (см. рис. 20).

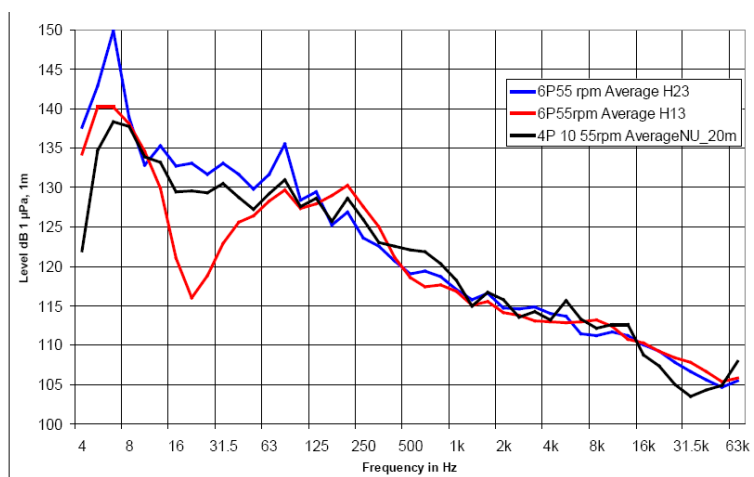


Рис. 19. Результаты измерения подводного шума под килем PLANET на полигонах Heggernes (черная линия) и Aschau (стенд 1 – красная линия, стенд 2 – синяя линия)

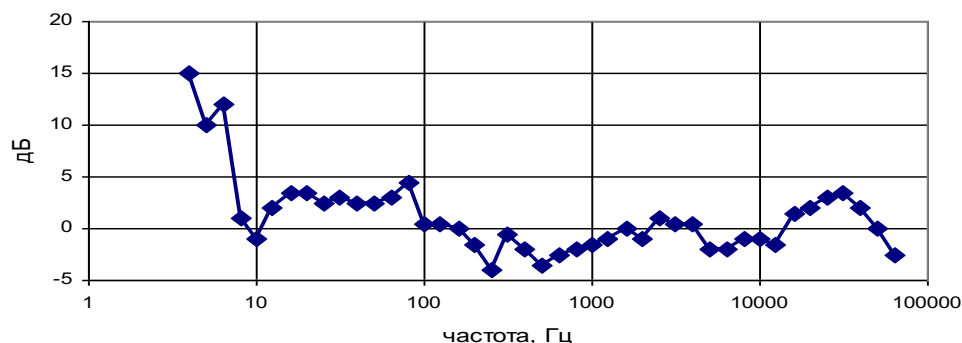


Рис. 20. Разность в уровнях подводного шума под килем судна PLANET, полученных в Aschau и Heggernes

Из этого рисунка видно, что на частотах ниже 8 Гц эта разность неприемлемо высока, однако эта частотная область и не охватывается ни американским стандартом [3], ни разрабатываемыми международными

Альманах современной метрологии, 2015, №5

стандартами. Разбросы результатов на частотах выше 8 Гц нерегулярны и имеют разные знаки, но по абсолютному значению не превышают 5 дБ. Тем не менее, эта величина также вызывает сомнения в обоснованности норм точности, закладываемых в разрабатываемые международные стандарты.

Еще худшие впечатления остаются от результатов сравнительных измерений (шума того же судна, проходящего в том же режиме и на тех же полигонах) в траверзном направлении. На рис. 21 показаны результаты измерений 1/3-октавных уровней шума в Aschau (стенд 1 – красная линия, стенд 2 – синяя линия) и Heggernes (зеленая линия – левый борт, черная линия – правый борт) [16].

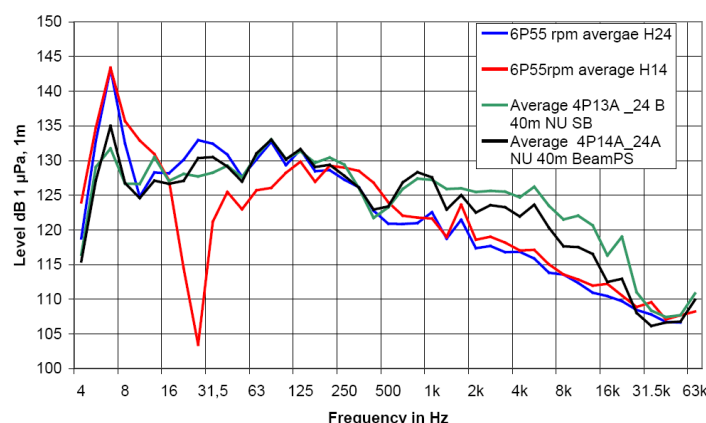


Рис. 21. Сравнение результатов измерения шума в траверзном направлении в Aschau (стенд 1 – красная линия, стенд 2 – синяя линия) и Heggernes (зеленая линия – левый борт, черная линия – правый борт) [16]

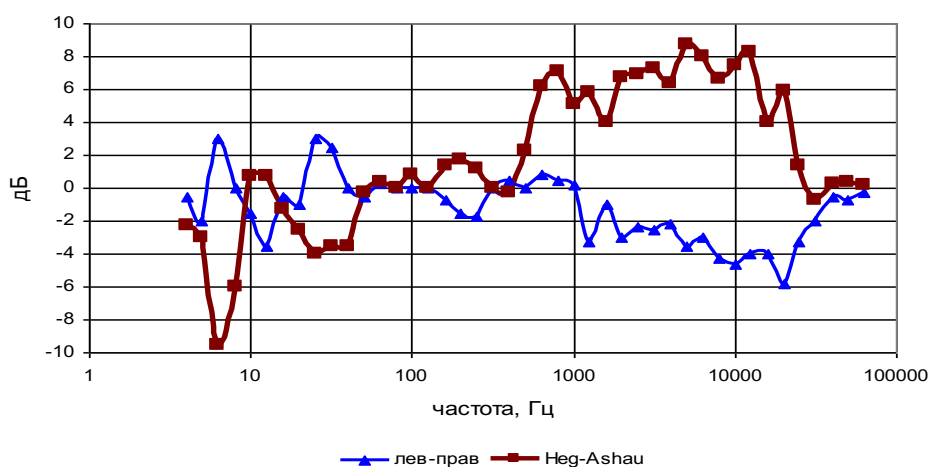


Рис. 22. Разница между уровнями шума, измеренными по правому и левому борту PLANET в Heggernes (синяя линия) и усредненными (по обоим направлениям) уровнями шумов, измеренными в Aschau и Heggernes (коричневая линия)

Авторы [16] обращают внимание на существенную разницу в уровнях шума, измеренного со стороны правого и левого борта PLANET в Heggernes, которая не подтверждена при измерениях в Aschau. Авторы настоящей статьи вычислили эту разницу (по данным рис. 21), а также разность между уровнями, измеренными в Aschau (стенд 2), и уровнями, усредненными по обоим бортам PLANET в Heggernes, и представили эти данные на рис. 22.

Первую из этих разностей в уровнях, измеренных в Heggernes (синяя ломаная линия на рисунке 22), лежащую в диапазоне от + 3 до – 6 дБ, трудно объяснить особенностями структуры поля, излучаемого PLANET, тем более, что она не подтверждена измерениями в Aschau. А знакопеременную (по частоте) разность усредненных (по левому и правому борту) уровней, лежащую в диапазоне от – 10 до + 9 дБ, трудно воспринять как некую воспроизводимость результатов траверзных измерений на двух полигонах. И что в этом случае делать с неопределенностью измерений, установленной в американском стандарте [3] или закладываемой в разрабатываемые международные стандарты?

И наконец, небезинтересными представляются исследования, оценивающие степень совпадения результатов измерений подводного шума одного и того же объекта, проведенных с помощью разных приемных систем, установленных на одном полигоне в соответствии со стандартными рекомендациями [3] и [13]. Такие исследования были проведены в рамках проекта SIRAMIS Европейского оборонного ведомства в 2012 году на базе полигона Aschau (Германия) [17]. Испытаниям подверглись 3 мобильных измерительные системы из трех стран, установленные на дне в линию так, чтобы измеряемое судно проходило точно над ними, а затем и над стационарной (в данном случае – референтной) измерительной системой полигона. Точность прохода контролировалась с помощью GPS, галсы с отклонениями от линии установки гидрофонов более 5 м не засчитывались. В испытаниях принимали участие 3 судна. Результаты измерений их подводного шума с помощью мобильных систем сравнивались с результатами, полученными на референтной системе полигона. Результат сравнения представлялся в виде разности (в дБ) измеренных уровней в 1/3-октавных полосах. Сравнение результатов измерения шума двух кораблей (Ship 1 и Ship 3) двумя измерительными системами I и II представлены на рис. 23.

Сравнивая красную и зеленую ломаные линии в левой и правой частях рис. 23, отмечаем поразительную и труднообъяснимую несхожесть результатов измерений двумя системами. На отдельных частотах несовпадение достигает 14 дБ (Ship I – 50 Гц), 10 дБ (Ship I – 400 Гц), 7 дБ (Ship II – 30 Гц) и 13,5 дБ (Ship II – 400 Гц). Эти несовпадения превышают даже результаты предыдущего эксперимента с измерениями на различных полигонах. Скорее всего, измерительные системы, стационарно установленные на полигонах,

более адаптированы под конкретные условия полигонов, чем мобильные измерительные устройства, использованные в экспериментах, представленных на рис. 23.

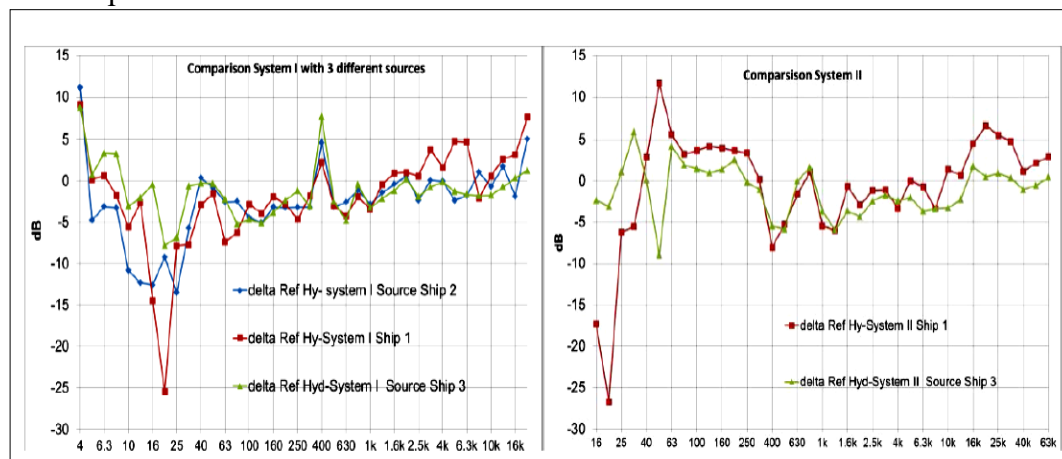


Рис. 23. Сравнение результатов измерения подводного шума двух кораблей (Ship 1 и Ship 3) двумя разными измерительными системами [17]

Показанные выше несовпадения связаны, прежде всего, с инструментальной неопределенностью измерений, в основе которой лежат характеристики применяемых подводных измерительных систем. Системы для измерений подводного шума, рекламируемые фирмами-разработчиками, состоят, как правило, из одного (аналогового [19, 20] или цифрового [21]) гидрофона или нескольких гидрофонов [21, 22], кабеля (-ей) и устройства для обработки сигналов с выдачей результата измерений в стандартном формате, например, в соответствии с [3] и/или [13] (см. рис. 24).



Рис. 24. Цифровой гидрофон с блоком управления и ПК [21]

Продуманное расположение гидрофона (вдали от отражающих поверхностей, в отсутствие каких-либо обтекателей или устройств механической защиты гидрофона и пр.) позволяет предположить, что частотная характеристика чувствительности измерительной системы и направленность её чув-

ствительности примерно совпадают с соответствующими характеристиками гидрофона, измеренными в лабораторных условиях (в условиях «свободного поля»). Однако на практике конструкция измерительных систем существенно усложняется по тем или иным причинам. Для примера на рис. 25–28 показан внешний вид таких устройств.



Рис. 25. Донная установка гидрофона в соответствии с рекомендациями DNV [12]



Рис. 26. Подводная система IGLOO для измерения шума на мелководье [23]



Рис. 27. Приемное подводное устройство «Катран-5» [24]



Рис. 28. Система измерительная гидроакустическая ГУ-21 [25]

К сожалению, создатели и пользователи подводных измерительных акустических систем не приводят данных об их погрешностях, а ссылаются лишь на погрешность установленных в них гидрофонов, хотя понятно, что характеристики гидрофона в этом случае существенно искажаются, особенно на высоких частотах. В [26], например, показано, что относительно равномерная по частоте характеристика гидрофона после его установки на массивный носитель становится существенно неравномерной (с отклонениями до 6 дБ и более на частотах выше 6 кГц), а после закрытия гидрофона обтекатель эти отклонения могут превышать 10 дБ и на более низких частотах (начиная с 1,6 кГц). Именно поэтому в спецификации на измерительную гидроакустическую систему ГУ-21 (см. рис.28) установлены достаточно реальные пределы допускаемой относительной погрешности измерений звукового давления, равные ± 5 дБ [25].

Однако установка гидрофона вне таких сложных систем связана с определенными ограничениями, известными каждому экспериментатору, занимающемуся измерениями подводного шума кораблей. Эти ограничения, проявляющиеся, прежде всего, на низких частотах, заключаются в следующем:

- 1) воздействия на гидрофон перемещения водной массы (подводные течения, приливы и отливы, дрейф буя или измерительного судна), имеющего иногда турбулентный характер, приводят к появлению посторонних («паразитных») сигналов на выходе гидрофона. Уровень паразитных шумов этого происхождения проявляется на частотах ниже 100 Гц и зависит от диаметра гидрофона и скорости перемещения водной массы относительно гидрофона;
- 2) обтекание кабеля водой (особенно, если он сильно натянут) вызывает

его вибрацию, частота которой зависит от диаметра кабеля, его упругих свойств и скорости обтекания. Из практики авторов настоящей статьи такие вибрации с частотой 14 – 17 Гц возникали у нас на кабеле диаметром около 6 мм;

3) морское волнение и зыбь вызывают существенные трудности с пространственной стабилизацией гидрофона при его постановке с измерительного судна или буя, плавающего на поверхности. Следует напомнить, что вертикальное перемещение гидрофона на 10 см сопровождается изменением действующего на него гидростатического давления, равным 1 кПа, что соответствует уровню подводного шума 180 дБ относительно 1 мкПа. Если даже такие переменные давления лежат ниже частотного диапазона измеряемого подводного шума, они перенасыщают предварительный усилитель гидрофона, не давая ему измерять высокочастотные сигналы;

4) чувствительный элемент гидрофона, установленного в воде без каких-либо защитных приспособлений, может покрываться различными отложениями (мусор, донные отложения, микроорганизмы), которые могут вызывать шумы на различных частотах, а также изменять частотную характеристику чувствительности гидрофона и диаграмму его направленности.

Рассмотренные ограничения, как и конструктивные недостатки стационарных измерительных систем (рис. 26–28), следует рассматривать как источники инструментальной неопределенности при измерениях подводного шума морских объектов. В определенной мере они и объясняют наличие несовпадений измеренных значений подводного шума разными приемными системами (рис. 23) и на разных полигонах (рис. 15). Однако эти несовпадения имеют место не во всем частотном диапазоне измеряемых шумов, и поэтому их можно оценивать по-разному. Так, сами авторы исследований [16, 17] делают противоречивые выводы о результатах проведенных ими сличений. В [16] они приходят к выводу, что результаты сличений показали «хорошее и очень хорошее совпадение» (good and very good agreement), а в [17] утверждается, что сравнение результатов измерений одного и того же источника в рамках проекта SIRAMIS свидетельствует об их более высоком расхождении, чем ожидалось (The comparison ... shows higher deviation than expected). Дело в том, что, приступая к сличениям, их участники не определили заранее критерии сходимости результатов. А таким критерием могла бы быть допустимая разность между уровнем шума, измеренным каждым участником (полигоном, измерительной системой), и референтным значением уровня шума, определенным, например, как средневзвешенное значение результатов измерения всеми участниками на заданной частоте. А допустимая разность для каждого участника не должна бы превышать суммы заявленной им расширенной неопределенности измерений и неопределенности установления референтного значения. Такие критерии должны бы предъяв-

ляться в каждой 1/3-октавной полосе измеряемого диапазона частот, но возможно и ослабление такого требования: например, считать результаты сличений для данного участника положительными, если они удовлетворяют критерию сходимости для определенной доли (например, 80 %) 1/3-октавных частот измеряемого диапазона.

Подобные критерии, основанные на неопределенности результата измерений, целесообразно применять и при оценке соответствия корабля тому или иному требованию (например, DNV [13] или ICES [10]) по излучаемому им подводному шуму.

О необходимости учета неопределенности измерений при оценке акустического качества кораблей

Существующая до сих пор и узаконенная в соответствующих нормативных документах практика контроля и нормирования уровня подводного шума кораблей по среднему из ряда измерений вряд ли соответствует современным представлениям об оценке качества объекта. На наш взгляд, одной из причин этого является отсутствие четкого разграничения между такими понятиями, как «измерение», «испытание» и «контроль», и прежде всего в целях этих операций как экспериментального определения характеристик продукции.

Целью процедуры измерения является процесс экспериментального получения значения измеряемой величины, которое может быть обоснованно приписано этой величине в соответствии с предполагаемым использованием результата измерения [16]. Измерения подводного шума проводят при испытаниях и/или контроле шумности корабля. Одной из основных целей испытаний (как экспериментальной операции) следует считать **оценку степени соответствия продукции установленным нормам**. Как и при измерениях, результаты испытаний выражаются числовыми значениями параметра образца, но не в конкретных условиях, как в измерительной операции, а в заданных номинальных условиях [30].

Целью контроля, как экспериментального определения (путем измерения) значения контролируемого параметра образца и последующего сравнения полученного результата с заданными граничными допустимыми значениями, является получение однозначного суждения о пригодности образца к эксплуатации. Поскольку конечный результат контроля не выражается числовой величиной, в теории контроля принят иной подход к оценке адекватности его результатов и целей. Это вероятности ошибочных результатов контроля: вероятность ложного брака и вероятность необнаруженного брака.

Очевидно, что достоверность контроля зависит от правильности опреде-

ления истинного значения контролируемого параметра, т.е. в конечном итоге от погрешности его измерения. Чтобы снизить вероятность необнаруженного брака при значимой величине погрешности измерения, при контроле параметра M образца на соответствие какой-либо норме M_0 (допустим, необходимо, чтобы $M < M_0$) обычно пользуются контрольным допуском M_k (в нашем примере $M_k < M_0$), так чтобы величина $(M_0 - M_k)$ была в той или иной мере соизмерима с погрешностью измерений. Помимо прочего, это позволяет также избежать неопределенности интерпретации результатов контроля при совпадении измеренной величины с установленной нормой, т.е. при $M \equiv M_0$. Этот гипотетический, на первый взгляд, случай достаточно вероятен на практике, когда норма M_0 устанавливается на пределе технических возможностей производителя и достигнуть существенного повышения качества образца (в нашем случае $M \ll M_0$) не представляется возможным.

Из рис. 29, иллюстрирующего этот случай при симметричности $f(M)$ – функции плотности распределения вероятностей погрешности ΔM , видно, что при $M = M_0$ вероятность необнаруженного брака (т.е. когда в действительности $M > M_0$), как и вероятность ложной выбраковки продукции (когда в действительности $M < M_0$), равна 50 % и не зависит от погрешности измерения. В этом случае никаким повышением точности измерений эту вероятность уменьшить нельзя. Иначе говоря, если при проведении контроля ориентироваться лишь на установленную норму M_0 , а не пользоваться параметром контрольного допуска M_k , то в конечном числе ситуаций (относительно не малом для рассматриваемых задач) повышение точности измерений может оказаться бессмысленным [31].

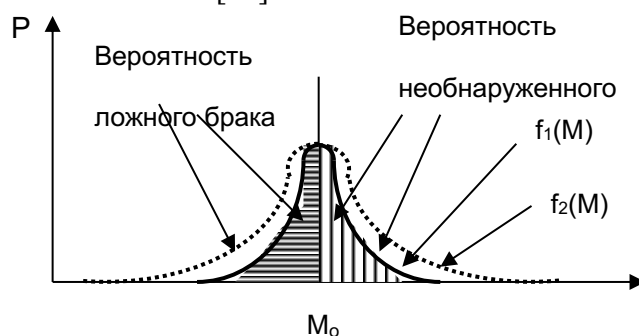


Рис. 29. Распределение погрешностей (функции f_1 и f_2) при совпадении измеряемой величины с нормой

При использовании контрольного допуска M_k (рис. 30) вероятность необнаруженного брака (площадь участка с вертикальной штриховкой) в крайнем случае, т.е. при $M \equiv M_k$, существенно уменьшится и будет, конечно, зависеть как от разности $(M_0 - M_k)$, так и от погрешности измерений

(функции плотности распределения вероятностей погрешности). Именно при этом подходе, т.е. при использовании контрольного допуска, существенно возрастает значение точности измерений. Высокая точность измерений позволяет вплотную приблизить значение контрольного допуска к установленной норме и снизить как неизбежные затраты производителя (вероятность ложного брака), так и риск потребителя (вероятность необнаруженного брака).

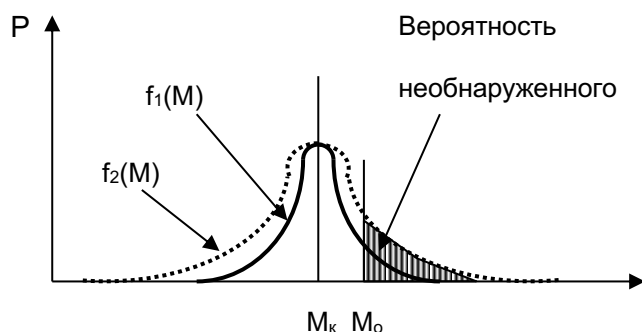


Рис. 30. Распределение погрешностей (функции f_1 и f_2) при совпадении измеряемой величины с контрольным допуском

Величину M_k или разность $(M_o - M_k)$ разумно назначать, ориентируясь на реально существующие погрешности и на требуемую степень достоверности результатов контроля. При этом следует, конечно, иметь в виду, что снижение вероятности необнаруженного брака сопровождается соответствующим возрастанием вероятности ложного забракования продукции. Именно поэтому установление величины контрольного допуска или разности $(M_o - M_k)$ является многоплановой задачей, учитывающей не только метрологические аспекты (достоверность оценки погрешности, соотношение между $(M_o - M_k)$ и погрешностью измерений при заданном уровне доверительной вероятности), но и экономические, технологические и прочие вопросы производства, а также специфику самого объекта испытаний и условия его эксплуатации. При этом следует учитывать следующее:

1. Вопрос обоснования и утверждения контрольного допуска, затрагивающий интересы как производителя (его излишние затраты при значительной доле ложной выбраковки), так и потребителя (его риск при конечной вероятности необнаруженного брака), достаточно сложен в реализации и поэтому должен решаться как можно раньше – на стадии разработки изделия или даже при составлении технического задания на разработку. В противном случае на этапе сдачи продукции может возникнуть тупиковая ситуация, исключающая объективный анализ результатов испытаний, обоснованное установление контрольного допуска и согласованное суждение о годности образца.

2. С другой стороны, заранее оговоренный и утвержденный контрольный допуск в абсолютных значениях, т.е. в единицах измерения параметра M , и далее (после его утверждения) как бы не зависящий от величины погрешности, начинает работать как новая норма ($M_k \equiv M_{он}$) в существующей ныне практике контроля. И опять может возникнуть описанная выше ситуация совпадения M с этой новой нормой, при которой достоверность результатов контроля не зависит от точности измерений. Но и в других случаях (при $M < M_{он}$) стимула для снижения погрешности нет – ведь ее значение фактически зафиксировано заранее, до начала создания образца.

При оценке результатов контроля возможен и иной подход, когда с нормой сравнивается не измеренное значение контролируемого параметра M , а его наихудшее значение, определяемое неопределенностью измерений (в нашем случае $M_{max} = M + \Delta M$). При этом за ΔM принимается расширенная неопределенность измерений при доверительной вероятности 95%, соответствующая 5%-ой вероятности необнаруженного брака. Именно этот уровень достоверности принят в настоящее время в отечественной и мировой метрологической практике. Этот вариант измерительного контроля реализован, например, в международных стандартах для оценки безопасности ультразвукового медицинского оборудования [32].

При этом целесообразно учитывать состоявшуюся эволюцию в трактовке неопределенности измерений от Концепции погрешности (которую иногда называют традиционным подходом или Концепцией **истинного значения**) к Концепции неопределенности, которая позволяет лишь приписать измеряемой величине **интервал достаточно обоснованных значений** [31]. **Верхняя граница этого интервала** (а именно она интересует заказчика при оценке акустического качества испытуемой продукции) и будет конечной целью проводимых испытаний.

Такой подход связывает воедино процесс изготовления и испытаний продукции, когда проблема точности измерений становится прямой заботой производителя. Если учесть специфику рассматриваемой здесь проблемы и несоизмеримость затрат на создание корабля и на его метрологическое обеспечение (последние составляют лишь доли процента), то целесообразность принятия именно этого варианта оценки результатов контроля не вызывает сомнений. Именно это позволит поставить значимые акценты на решении измерительных задач в прикладной гидроакустике.

Дополнительными преимуществами такого подхода будут: ясность интерпретации и возможность однозначного изложения в нормативных документах, независимость от специфики продукции (серийности, измеряемых параметров физического поля, функционального назначения и пр.), отсутствие необходимости обоснования, согласования и утверждения контроля допуска на каждый новый ее тип.

Для примера обратимся к реальной ситуации и примем во внимание, что контролируемый параметр M существенно зависит от частоты, его величина обусловлена также режимами функционирования объекта. Неопределенность измерения параметра M зависит от значения самого параметра, частоты, на которой он измеряется, условий испытаний, действующих методик и применяемых средств измерения. При таких многовариантных условиях однозначное установление контрольных допусков практически недостижимо. В то же время нормирование условий сдачи продукции и оценка результатов контроля по второму варианту не вызывает затруднений и при этих обстоятельствах.

Приведенный выше анализ реально достижимых точностей измерения уровней подводного шума надводных кораблей показал, что воспроизводимость результата измерений, проведенных по одной и той же методике, но на разных полигонах, крайне низка. Поэтому, чтобы снизить неопределенность измерений при сдаче объекта в эксплуатацию или при его периодическом контроле, при составлении технического задания на его проектирование разумно согласовывать все аспекты испытаний, включающие не только методику измерений (в некоторых случаях стандартизованную), но и конкретный полигон (или даже стенд), на котором эти испытания будут проводиться. Если при сдаче продукции (стенд) полигон находится в одном месте, а при контроле продукции в процессе ее эксплуатации – в другом, то такие условия должны оговариваться особо.

В заключение отметим, что мы представляем себе определенные трудности (как для производителя, так и для потребителя) отказа от сложившейся практики контроля параметров физического поля объектов и перехода к одному из предложенных вариантов. Но изложенные здесь аргументы могли бы стать предметом обсуждения при совершенствовании нормативной базы в области нормирования и контроля этих характеристик.

Литература

1. Leaper R., Renilson M. R., Frank V. and Papastavrou V. 2009. Possible steps towards reducing impacts of shipping noise. Presented to the IWC Scientific Committee, June 2009, Madeira, Portugal, SC/61/E19.
2. ISO/PAS 17208-1 Acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: General requirements for measurements in deep water.
3. ANSI S12.64-2009 Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements.
4. GJB 4057-2000 Measurement method for noise of ships (Chinese Standard).
5. ISO/DIS 16554.2 Ships and marine technology – Marine environment protection - Measurement and reporting of underwater sound radiated from merchant ships.

6. Andrew R. K., Howe B. M., Mercer J. A. and Dzieciuch M. A. Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver of the California coast. *Acoustic Research Letters Online*, 3(2), 2002.
7. McDonald M. A., Hildebrand J. A. and Wiggins S. M. 2006. Increases in deep ocean ambient noise in the pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of the Acoustical Society of America* 120(2): 711- 718.
8. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neue_Planet_von_vorn.jpg.
9. Andersen P.T. and Trimoreau B., Understanding the Problems of Underwater Noise, Lloyd's Register Consulting. Sept. 2013. Электронный ресурс: <http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Efteraar>
10. Underwater Noise of Research Vessels – Review and Recommendations, ICES, Cooperative Research Report No. 209, May 1995.
11. Knudsen H.P. and Nieuwejaar P.W. Guidelines and recommendations for ship design on noise and vibration reduction, EUROFLEETS2-WP11-D11.1-031214-V1.3.doc.
12. Электронный ресурс:
[http://www.eurofleets.eu/np4/%7B\\$clientServletPath%7D/?newsId=377&fileName=EUROFLEETS2_WP11_D11.1_031214_V1.3.pdf](http://www.eurofleets.eu/np4/%7B$clientServletPath%7D/?newsId=377&fileName=EUROFLEETS2_WP11_D11.1_031214_V1.3.pdf).
13. DNV “Rules for Ships”, Part 6, Chapter 24.
14. STANAG No 1136: 1995 (Edition 3) NATO – Standardization Agreement – Standards for use when measuring and reporting radiated noise characteristics of surface ships, submarines, helicopters etc. in relation to sonar detection and torpedo acquisition risk.
15. Peña H., Øvredal J.T., Totland B. and Handegard N.O. Underwater sound measurements from fishing vessel “Brennholm”.
Электронный ресурс: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/116442>
16. JCGM 200:2008 Internal vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
17. MEPC 66/6/6 «Noise from commercial shipping and its adverse impacts on marine life» (DE57).
18. Электронный ресурс:
<http://www.epa.gov/oms/documents/oceanvessels/mepc-66-6-6-comments-mepc-65-amend-nox-tier-3.pdf>.
19. Schäl S., Homm A. Radiated underwater noise levels of two research vessels, evaluated at different acoustic ranges in deep and shallow water, Proceedings of 11th European Conference on Underwater Acoustics ECUA 2012, 2 – 6 July 2012, Edinburgh, UK, p. 1128-1135.
20. Schäl S. Adulteration of underwater acoustic measurements, Proceedings of the Conference Inter.Noise-2014, Melbourne, Australia, November, 2014.

21. International Fund for Animal Welfare. Final Report: Measuring Ship Noise, Nov. 2011. Электронный ресурс:
<http://www.marineconservationresearch.co.uk/wp-content/Downloads/>
22. Portable Underwater Acoustic Measuring System PUAMS-SS03. Электронный ресурс: http://www.ssa.gr/PUAMS_SS02.pdf.
23. Underwater Acoustic Ranging System (UARS, Brüel & Kjær). Электронный ресурс: <http://www.bksv.com/doc/bu3099.pdf>.
24. Tesei A., Pinzani D., Corradino L. An advanced digital hydrophone array for ship noise measurements.
 Электронный ресурс: <http://www.smidtechnology.it/upload/allegati/9129.pdf>
25. Underwater Ship Noise Characterization (Brüel & Kjær). Электронный ресурс: <http://www.bksv.ru/doc/bn1352.pdf>.
26. Listewnik K. Underwater noise generated by merchants ships in coastal waters of the Gulf of Gdansk, Proceedings of the Conference Inter.Noise-2014, Melbourne, Australia, November 2014.
27. Цыганков С.Г., Теверовский Г. Измерение шумности – технологии двойного назначения// Национальная оборона, № 6, 2015.
28. Система измерительная гидроакустическая ГУ-21 (ФГУП «ВНИИФТРИ»)
 Электронный ресурс: <http://www.vniiftri.ru/index.php/ru/struct/nik-2>.
29. Исаев А.Е. и др. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне// Альманах современной метрологии, № 2, 2015, с. 76-102.
30. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во. стандартов. - 1991.
31. Еняков А.М., Сильвестров С.В. Об оценке и интерпретации результатов измерительного контроля/ Сб. научн. трудов ВНИИФТРИ «Проблемы развития средств гидроакустических измерений и методов обработки информации.- М.- ВНИИФТРИ, 2000, с. 44 – 48.
32. ГОСТ Р МЭК 61157-2008 Государственная система обеспечения единства измерений. Изделия медицинские электрические. Приборы ультразвуковой диагностики. Требования к представлению параметров акустического выхода в технической документации.