

И. В. Грушецкий

ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова

Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: editor@ejta.org

Коэффициенты внутренних потерь судовых конструкций и их использование в расчетах звуковой вибрации и шума

Получена 05.12.2006, опубликована 25.01.2007

Представлены результаты измерений коэффициентов внутренних потерь (КВП) разнообразных судовых конструкций. Обнаружено, что КВП конструкций судна отличаются большим разбросом в значительной степени случайного происхождения. На основании данных измерений оценены статистические характеристики КВП как случайной величины. Представлен пример расчета энергетическим методом распространения вибрации по фрагменту судна. При этом применен вероятностный подход, где в качестве исходных данных использованы КВП, генерируемые на основании статистических характеристик, полученных по данным измерений. Результаты расчета демонстрируют вероятный разброс ожидаемой вибрации удаленных от источника судовых конструкций до 7–10 дБ. Тем самым подтверждена целесообразность применения вероятностного подхода и приближенных методов для расчета звуковой вибрации и шума на судах.

ВВЕДЕНИЕ

Для расчетов звуковой вибрации судовых конструкций и шума в помещениях обычно применяется энергетический метод [1, 2]. Целесообразность применения именно этого метода связана со сложностью конструкции судна, состоящего из множества разнообразных элементов, чем обусловлена возможность выполнения только приближенных практических расчетов. В качестве исходных данных в системе уравнений энергетического баланса используются коэффициенты внутренних потерь (КВП) в подсистемах, коэффициенты энергетической связи подсистем и колебательные мощности, вводимые в подсистемы от внешних источников — механизмов и оборудования судна. Если коэффициенты энергетической связи и вводимые мощности могут быть рассчитаны с применением аналитических зависимостей [3–8 и др.] или численно [9–12 и др.], то КВП могут быть *только измерены*, причем в натурных условиях. Данные измерений коэффициентов потерь (КП)¹ судовых конструкций в

¹ Различие между КВП (физической характеристикой) и КП (измеряемой величиной) объясняется в разделе 1.2

широком диапазоне частот удалось обнаружить только в нескольких работах [5, 13]². Но и в этих работах данные представлены весьма скудно, и по предварительному предположению автора данной статьи не отражают в полной мере возможного разнообразия КП, связанного с реальным разнообразием судовых конструкций. Поэтому измерения КП, результаты которых представлены в данной статье, были выполнены на множестве конструкций, каждую из которых можно считать вполне типовой. Обнаружено что КП конструкций судна, на котором выполнялись измерения, действительно могут существенно различаться. На основании полученных данных предложено использовать при расчете звуковой вибрации и шума на судах вероятностный подход, рассматривая КП как случайную величину. Пример расчета представлен в статье.

1. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОТЕРЬ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. Метод измерений

Определение КП судовых конструкций проводилось по временной зависимости снижения уровней вибрации после удара кувалдой весом 5 кг. Метод, видимо, впервые примененный М. Хеклем [14], аналогичен тому, который используется при определении времени реверберации в помещениях. КП (η) рассчитывается по формуле $\eta = 2,2/fT$, где f — частота, Гц; T — время реверберации, с (время снижения уровней вибрации на 60 дБ). Такой метод измерений относительно прост при реализации в натурных условиях и имеет некоторые преимущества по сравнению с другими методами. В частности, общеизвестный метод определения КП по ширине резонансных максимумов не эффективен при высокой плотности мод колебаний (на средних и высоких частотах для большинства крупногабаритных судовых конструкций), а также при отсутствии четко выраженных резонансных максимумов при достаточно больших потерях, что реально имеет место. К тому же, для расчета вибрации и шума в полосах частот (октавных или третьоктавных) необходима информация о значениях КП в тех же полосах частот. Метод определения КП по ширине резонансных максимумов не дает такие значения непосредственно. Метод, основанный на законе сохранения энергии, согласно которому введенная энергия равна поглощенной [15], представляется более подходящим для изолированных конструкций, чем для конструкций в составе судна. Кроме того, чрезвычайно большой объем измерений при реализации этого метода неприемлем для натурных условий.

Следует отметить один из недостатков метода определения КП по спаду уровней вибрации, связанный с тем, что анализ временной зависимости снижения уровней и ее аппроксимация прямой линией производится вручную. В большинстве случаев кривая спада уровней имеет весьма сложную, неоднозначную форму, поэтому субъективные

² Некоторые сведения о КП судовых конструкций представлены и в других работах, но использовать эти данные в практических расчетах по разным причинам невозможно. Например, в [4] КП получены на некоторой промежуточной стадии постройки судна.

ошибки вполне вероятны³. Более того, можно предположить, что субъективная ошибка в данном случае является основной составляющей погрешности. Согласно результатам исследований [16] субъективная ошибка при измерениях времени реверберации в реверберационных камерах может быть сопоставима по величине с объективными ошибками. И это при условии, что спад уровней звукового давления в реверберационной камере обычно вполне однозначный. Численная оценка субъективных ошибок измерений является предметом специальных исследований. Поэтому оценки погрешности вообще не выполнялись, а для снижения погрешности измерения с последующим усреднением результатов выполнялись в нескольких точках при ударе кувалдой в нескольких других точках, аналогично тому, как рекомендуется измерять время реверберации в помещениях. Положение точек измерений и ударов выбиралось случайным образом. Если по субъективным экспертным оценкам разброс результатов оказывался большим, то проводились дополнительные измерения.

В некоторых случаях спад уровней вибрации после удара не может быть аппроксимирован с достаточной точностью одной прямой линией; требуется две или даже три линии, каждой из которых соответствует свой КП. Обычно считается, что это связано с тем, что в полосу частот попадает несколько частот свободных колебаний конструкции с модами колебаний, имеющими разные коэффициенты потерь. Применительно к судну — сложной конструкции, состоящей из множества элементов, этот физический процесс имеет особенность, которая демонстрируется ниже на примере более простой экспериментальной модели — «ящика».

«Ящик» состоит из металлических листов толщиной 0,7 мм. Размеры каждой из четырех боковых стенок — 0,6×0,9 м, верхней — 0,6×0,6 м. Стенки «ящика» имеют разный коэффициент потерь: КП боковых стенок несколько больше, чем верхней стенки. На кривой спада уровней вибрации боковой стенки в некоторых полосах частот отчетливо проявляются два участка (рис. 1а). Линия спада уровней вибрации верхней стенки вполне однозначно аппроксимируется только одной прямой линией. Измеренные значения КП представлены на рис. 2, из которого видно, что КП боковой стенки, измеренные по конечному участку временной зависимости уровней вибрации после удара, примерно соответствуют КП верхней стенки. После удаления верхней стенки второй участок на кривой спада вибрации боковой стенки пропадает (рис. 1б). Полученные результаты можно объяснить следующим образом. После удара колебательная энергия распространяется по всему «ящику». В боковых стенках затухание происходит быстрее, и в какой-то момент времени их колебания становятся обусловленными притоком энергии из верхней стенки, где внутренние потери меньше.

Аналогичные процессы происходят, видимо, в судовых конструкциях. Участок кривой спада, следующий за начальным, может быть связан с колебаниями смежных конструкций, имеющих сравнительно низкий КП. Т.е. неравномерность спада уровней после возбуждения сложной конструкции может быть связана не только с разной

³ Автоматизированный процесс определения времени реверберации, реализованный в некоторых приборах, дает худшие результаты в случае неоднозначного спада уровней, чем ручная обработка.

скоростью затухания разных мод колебаний конструкции в целом, но и с разной скоростью затухания колебаний отдельных конструктивных элементов (видимо, в первую очередь смежных), колеблющихся на собственных модах.

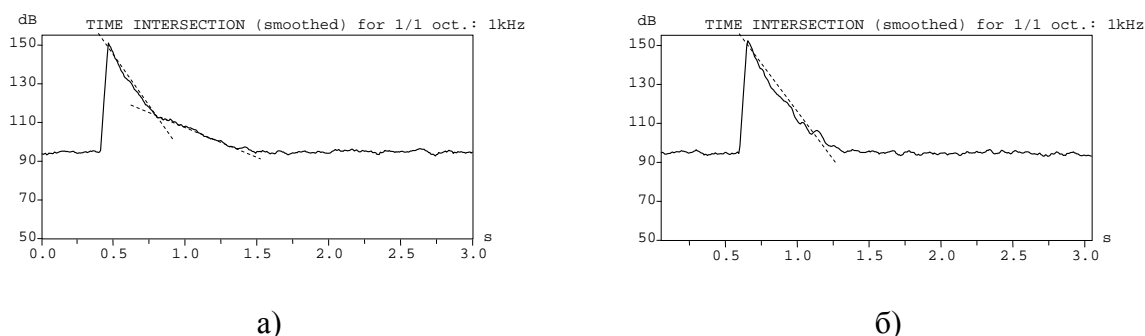


Рис. 1. Снижение уровней вибрации боковой стенки после удара при наличии (а) и отсутствии (б) верхней стенки (октавная полоса 1000 Гц)

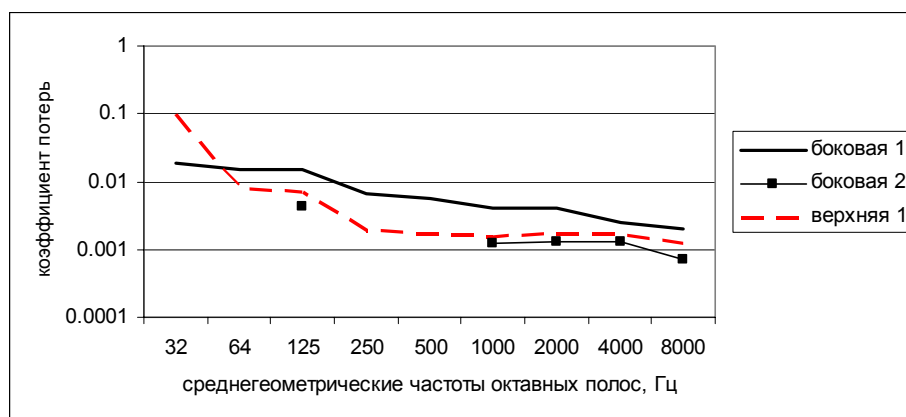


Рис. 2. Коэффициент потерь боковой стенки, полученный по начальному (1) и следующему за ним, конечному (2), участкам временной зависимости уровней вибрации после удара, а также КП верхней стенки

По результатам измерений КП, представленных ниже, можно выявить (весьма условно, разумеется) две группы конструкций: конструкции с относительно высокими и относительно низкими потерями. Наличие двух или более участков на кривой спада характерно в первую очередь для конструкций с высокими потерями. Анализ КП, полученных по разным участкам кривой спада, подтвердил, что конечные участки кривой спада для конструкций с высокими потерями соответствуют затуханию колебаний в конструкциях с относительно малыми потерями. Такие колебания в возбуждаемой конструкции с высокими потерями возникают вследствие оттока энергии и последующего обратного притока из соседних конструкций с относительно малыми потерями.

Таким образом, КП конструкции, которая возбуждается при измерениях, следует определять по начальному участку кривой спада ее уровней вибрации. Именно так получены КП, представленные в настоящей статье.

1.2. Физический смысл измеряемого КП

Измеряемый КП конструкции в составе корпуса судна (η_u) обусловлен внутренними потерями в конструкции ($\eta_{вн}$ — КВП), оттоком энергии за пределы того участка конструкции, колебания в котором возбуждаются при измерениях ($\eta_{св}$), и потерями на излучение (η_r):

$$\eta_u = \eta_{вн} + \eta_{св} + \eta_r. \quad (1)$$

Для оценки составляющих КП, помимо измерений на полностью построенном и оборудованном судне, были выполнены измерения КП фрагмента конструкции, подвешенного для измерений на кране, и КП конструкций судна на стапеле, когда конструкции сварены, но никакое оборудование не установлено. Обнаружено, что КП конструкций построенного судна намного больше, чем КП тех же конструкций на стапеле. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты последовательных измерений КП для одного из перекрытий.

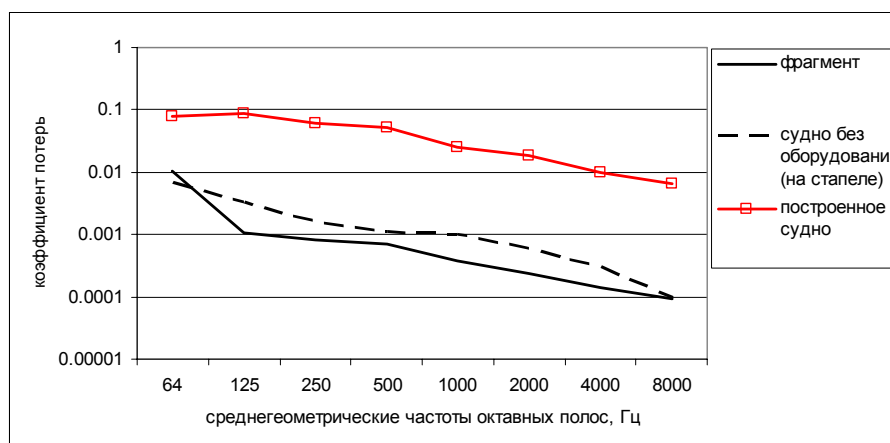


Рис. 3. КП перекрытия на разных стадиях постройки судна

Измеряемый КП фрагмента конструкции обусловлен внутренними потерями и потерями на излучение: $\eta_u = \eta_{вн} + \eta_r$. Увеличение измеряемого КП перекрытия в составе необорудованного корпуса на стапеле, по сравнению с фрагментом, связано в первую очередь с возникновением оттока энергии из конструкции в смежные конструкции через появившиеся механические связи (внутренние потери и потери на излучение в воздух практически не изменяются). В дальнейшем, по мере насыщения судна оборудованием, изменяется в первую очередь КВП, а отток энергии в смежные конструкции и окружающую среду примерно сохраняется. Поскольку значения КП конструкций полностью построенного судна намного больше КП конструкций необорудованного корпуса, можно утверждать, что КП, измеренные на построенном судне, практически обусловлены внутренними потерями в конструкциях, т. е. эти измеренные значения являются КВП конструкций.

1.3. Результаты измерений

Измерения проводились на судне длиной 100 м, водоизмещением 2000 тонн. КВП были получены для 19-ти разных судовых конструкций (борта, днище, второе дно, перекрытие, платформа, переборки, фундамент, опорная рама). Конструкции отличаются толщиной листов обшивки, характеристиками подкрепляющего набора, материалом (сталь, алюминий, стеклопластик); многие конструкции облицованы вибродемпфирующим покрытием, днище и борта граничат одной стороной с водой; на большинстве конструкций установлено разнообразное оборудование, закреплены трубопроводы, электрические кабели, декоративные покрытия и т. п., причем, насыщение конструкций таким оборудованием различно. Т.е. конструкции отличаются разнообразными особенностями, которые могут существенным образом влиять на значения КВП. Действительно, из результатов измерений, представленных на рис. 4, видно, что КВП отдельных конструкций могут отличаться на порядок.

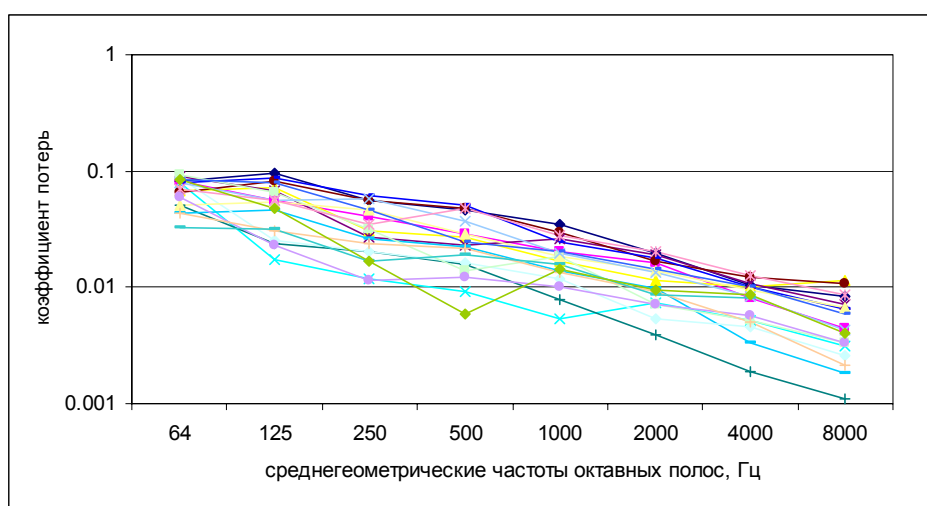


Рис. 4. Коэффициенты потерь 19-ти судовых конструкций

Анализ результатов измерений позволяет выявить, некоторые наиболее общие закономерности. В частности, сравнительно высокие КВП характерны для конструкций, облицованных вибродемпфирующим покрытием, и для горизонтально расположенных конструкций (перекрытия, платформы). Остальные конструкции имеют сравнительно низкий КВП. Средние значения высоких и низких КВП отличаются в 2–2,5 раза

Подобная классификация конструкций согласуется с использованной в работе [13], где судовые конструкции, различающиеся величиной коэффициентов потерь, подразделяются на горизонтальные и вертикальные, т. е. на перекрытия и переборки. Интересно отметить, что КВП, представленные в [13], и полученные в настоящей работе (усредненные по нескольким перекрытиям и переборкам, необлицованным вибродемпфирующим покрытием) практически совпадают на частотах 500–4000 Гц (см. рис. 5). Видимо, такие средние значения КВП действительно характерны для конструкций большинства судов.

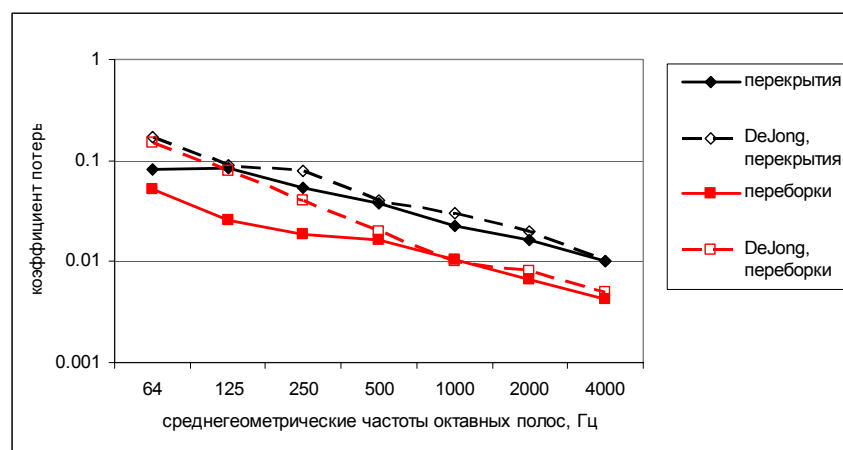


Рис. 5. КВП перекрытий и переборок, не облицованных вибродемпфирующим покрытием, и КВП перекрытий и переборок, представленные в [13] (De Jong)

Разделение конструкций на две большие категории весьма условно. В пределах каждой из категорий КВП могут различаться в 2–3 раза и даже более. Для иллюстрации на рис. 6 представлены средние, максимальные и минимальные значения КВП двух указанных категорий конструкций.

Влияние на КВП особенностей отдельных конструкций в пределах категорий не подчиняется каким-либо четко выраженным закономерностям. Поэтому более подробное разделение конструкций на категории с использованием данных настоящих измерений выполнить не удастся. Возможно, что влияние на КВП тех или иных особенностей конструкций может быть обнаружено при более подробном изучении. Однако при расчетах вибрации и шума проектируемых судов, с учетом разнообразия конструктивных особенностей, которые могут влиять на КВП, представляется нереальным назначить КВП, точно соответствующие каждой конкретной конструкции. Поэтому следует использовать некоторые обобщенные данные, и полученных данных вполне достаточно для практических расчетов.

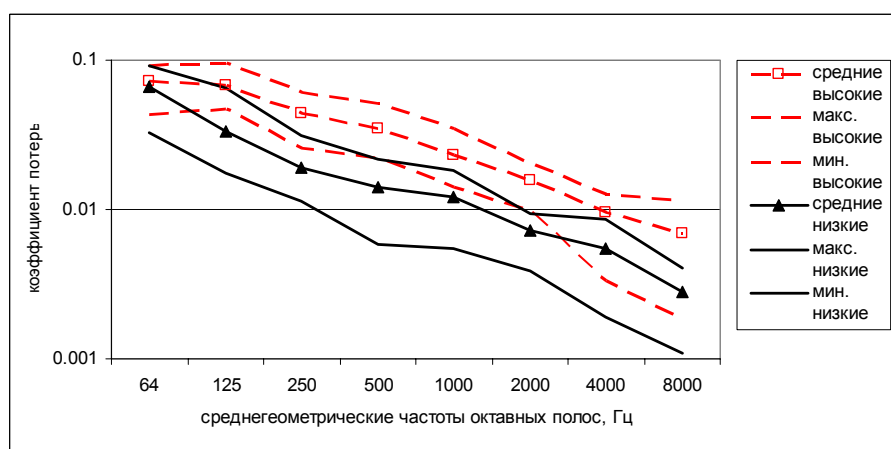


Рис. 6. КВП двух категорий судовых конструкций: с относительно высокими и относительно низкими потерями (средние, максимальные и минимальные значения)

1.4. Использование результатов измерений

При столь значительном разбросе КВП уровни вибрации конструкций судна, рассчитанные по средним КВП, могут существенно отличаться от фактических (измеренных) значений⁴. Можно предположить, что при расчете целесообразно использовать вероятностный подход, полагая, что разброс КВП в пределах указанных выше категорий имеет случайное происхождение. Статистические характеристики КВП как случайной величины могут быть получены по данным измерений.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВП

Вполне подходящим законом распределения измеренных значений КВП является, нормальный закон распределения логарифма этой величины ($\lg \eta$). На основании этой гипотезы и фактических данных измерений определяются статистические характеристики величины: среднее значение и стандартное отклонение (дисперсия). По этим характеристикам и закону распределения мы можем генерировать случайные значения КВП для использования в вероятностном расчете вибрации и шума судна. Точнее, генерируются значения логарифма КВП, которые затем преобразуются в КВП по формуле $\eta_g = 10^{\lg \eta_g}$ (индекс «g» означает генерируемое значение). На рис. 7 представлены 500 случайных значений КВП в каждой октавной полосе, а также статистические характеристики этой совокупности: средние значения (математические ожидания) и границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95 (во всех последующих расчетах доверительная вероятность равна 0,95). Представлены также средние, максимальные и минимальные измеренные значения КВП. Из рис. 7 видно, что генерируемые КВП вполне соответствуют измеренным.

3. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассмотрим вероятный разброс конечных результатов расчета вибрации судовых конструкций, связанный с неопределенностью информации о КВП, на примере расчета вибрации фрагмента условного судна.

Для расчета использована конструкция из 22 одинаковых стальных пластин 3×3 м, толщиной 7 мм, представленная на рис. 8а. Расчет выполняется энергетическим методом. Энергия внешних источников (W), равная 1 на всех частотах, вводится в нижнее перекрытие (1). Энергия колебаний пластин рассчитывается путем составления и решения системы уравнений энергетического баланса (СУБД). Коэффициенты энергетической связи рассчитываются из известных аналитических значений коэффициентов прохождения через соединения пластин, которые примерно равны 0,5 — для углового соединения, 0,2 — для Т-образного, 0,1 — для крестообразного. Учитывается распространение энергии только по конструкции (помещения не включены в СУЭБ). КВП пластин конструкции является случайной величиной, за исключением

⁴ Разумеется, имеются и другие источники погрешности расчета, которые здесь не рассматриваются

КВП шести боковых пластин серого цвета, который задан равным 0,9, чтобы приближенно смоделировать необратимый отток энергии за пределы рассматриваемого фрагмента судна.

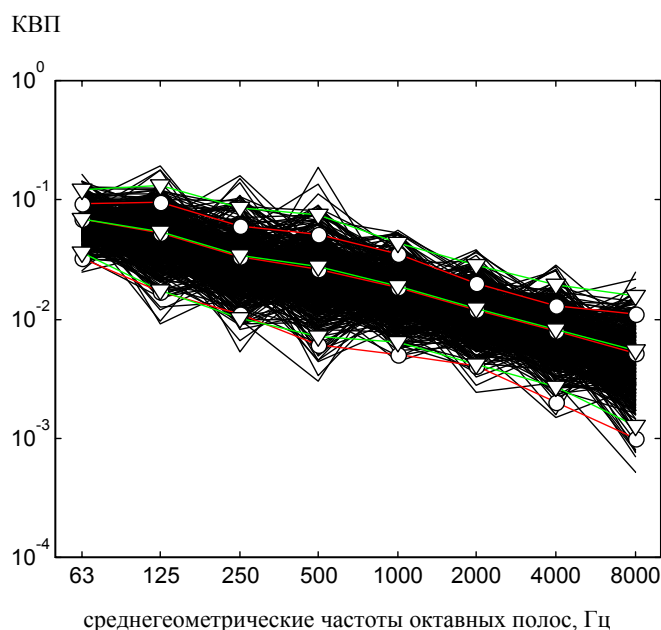


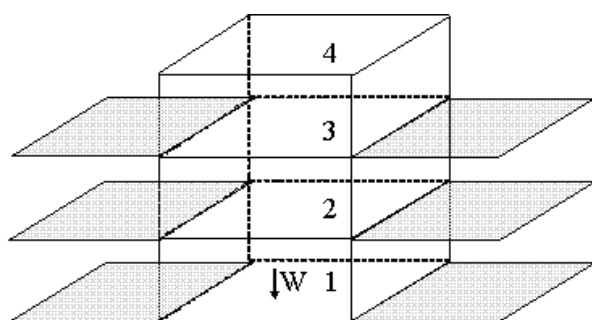
Рис. 7. Коэффициенты потерь:

- ▽ измеренные значения (средние, максимальные и минимальные значения);
- генерируемые в соответствии с нормальным законом распределения величины $\lg \eta$ (500 значений на каждой частоте);
- средние значения генерируемых КП, а также верхняя и нижняя границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95

Процедура расчета аналогична использованной в [17] при оценке влияния неопределенности коэффициентов энергетической связи подсистем:

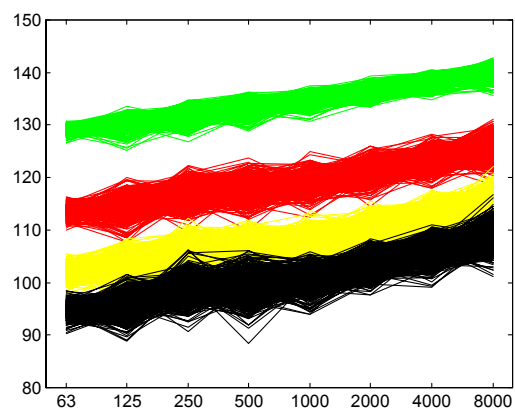
1. Для подсистем генерируются случайные значения КВП.
2. Находятся решения СУЭБ.
3. Такая процедура выполняется многократно.
4. По совокупности решений определяются статистические характеристики результатов расчета.

На рис. 8(б) представлены энергии колебаний перекрытий 1, 2, 3 и 4, обозначенных на рис. 8(а), рассчитанные для 500 случайных наборов КВП (рис. 7); на рис. 8(в) — доверительные интервалы для совокупностей результатов расчета; на рис. 8(г) — ширина этих доверительных интервалов, т. е. ширина «рукава» значений энергии, в который могут попадать результаты расчета при неопределенных значениях КВП. Из рис. видно, что для удаленных перекрытий (2, 3, 4) ширина доверительных интервалов достигает 7–10 дБ.



а)

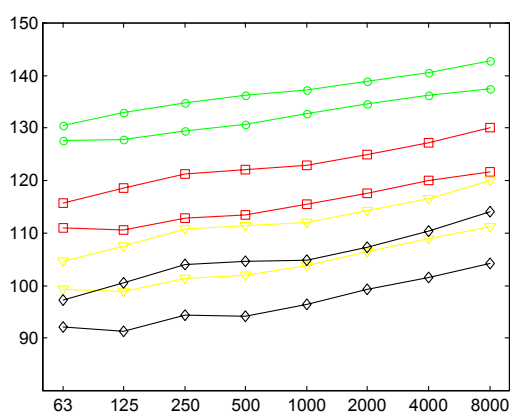
энергия колебаний, дБ



среднегеометрические частоты октавных полос, Гц

б)

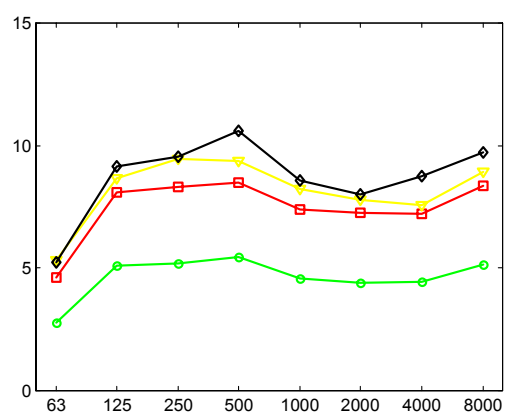
доверительный интервал, дБ



среднегеометрические частоты октавных полос, Гц

в)

ширина доверительного интервала, дБ



среднегеометрические частоты октавных полос, Гц

г)

Рис. 8. Фрагмент условного судна для примера расчета (а) и рассчитанная энергия колебаний перекрытий 1 (зеленый, \circ), 2 (красный, \square), 3 (желтый, ∇), 4 (черный, \diamond): б) все значения, в) доверительные интервалы, г) ширина доверительных интервалов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коэффициент внутренних потерь (КВП) — одна из величин, используемых при расчете звуковой вибрации и шума, выполняемом при проектировании судна, которую можно получить только измерениями. При этом известные данные натурных измерений КВП крайне ограничены. С целью получения дополнительной информации измерения КВП выполнены на множестве конструкций типового судна.

Основной вывод по результатам измерений состоит в том, что разброс значений КВП корпусных и внутрикорпусных конструкций судна значителен: максимальные и минимальные измеренные КВП отличаются на порядок. КВП зависит от совокупности множества весьма неопределенных факторов. Например, КВП в значительной степени зависит от насыщения конструкции судовым оборудованием, т. е. от количества и свойств механизмов, оборудования, трубопроводов, кабелей, зашивок и т. п., закрепленных на конструкции, а также, видимо, от свойств креплений.

Анализ всей совокупности результатов измерений позволяет выявить некоторые общие закономерности. В частности, более высокие значения КВП характерны для конструкций, облицованных ВДП, и для внутрикорпусных конструкций (даже необлицованных ВДП), расположенных горизонтально (перекрытий, платформ). КВП таких конструкций в среднем в 2–2,5 раза больше КВП других конструкций. Однако в пределах этих двух категорий конструкций разброс КВП остается значительным.

При большом и в значительной степени случайном разбросе КВП отдельных судовых конструкций при расчете невозможно назначить каждой конструкции точно соответствующие ей КВП. Используются некоторые средние значения. Однако представленный пример вероятностного расчета энергетическим методом вибрационной энергии конструкций фрагмента условного судна показал, что для удаленных конструкций возможный разброс вибрации (ширина доверительного интервала результатов вероятностного расчета), связанный только с неопределенностью значений КВП достигает 7–10 дБ. Неопределенность других исходных данных, используемых в энергетическом методе расчета: коэффициентов энергетической связи и вводимой мощности [17] — приведет к увеличению вероятного разброса результатов расчета.

При таком большом разбросе средние расчетные значения не дают достаточно ясного представления об ожидаемых уровнях вибрации и шума. Более адекватным является вероятностный подход к расчету, при котором результаты расчета представляются в виде среднего значения и вероятного отклонения.

Ожидаемый большой вероятный разброс результатов расчета обусловлен реальной неопределенностью физических характеристик судовых конструкций, в том числе КВП, рассмотренных в статье. Следствием этого является принципиальная невозможность выполнения каких-либо точных расчетов и целесообразность использования приближенных методов, к которым относится энергетический метод.

Автор благодарит А. А. Гришину за помощь в проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет уровней шума в судовых помещениях. Методика. ОСТ 5.0173-75, 1975.
2. «Designer Noise» — программа для расчета звуковой вибрации и шума в судовых помещениях, Noise Control Engineering Inc., USA.
3. Гутин Л. Я. Избранные труды. Л., «Судостроение», 1977.
4. Никифоров А. С., Будрин С. В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л., Судостроение, 1968.
5. Бородинский Л. С., Спиридонов В. М. Снижение структурного шума в судовых помещениях. Л., Судостроение, 1974.
6. Ляпунов В. Т., Никифоров А. С. Виброизоляция в судовых конструкциях. Л., «Судостроение», 1975.
7. Попков В. И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. Л., «Судостроение», 1974.
8. L. Cremer, M. Heckl, E. E. Ungar. Structure-Borne Sound, 2nd edition, Springer, Berlin, 1988.
9. Грушецкий И. В., Смольников А. В. Применение метода конечных элементов для расчета коэффициентов энергетической связи, используемых в статистическом энергетическом методе, на примере углового соединения балок. Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2004, 6.
10. Грушецкий И. В., Смольников А. В. Определение коэффициентов энергетической связи двух балок с использованием метода конечных элементов. Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2005, 24.
11. C. Simmons. Structure-borne sound transmission through plate junctions and estimates of SEA coupling loss factors using the finite element method. JSV. 1991, V. 144, pp. 215–227.
12. C. Hopkins. Statistical energy analysis of coupled plate systems with low modal density and low modal overlap. JSV. 2002, V. 251, No 2, pp. 193–214.
13. Richard G. De Jong. Statistical Energy Analysis of Ship Structure-borne Sound. Inter-Noise 2003, Seogwipo, Korea, August 25–28, 2003, paper № 121.
14. M. Heckl. Measurement of absorption coefficients on plates. JASA, 1962, 34(6), 803–808.
15. Brandon C. Bloss, Mohan D. Rao. Estimation of frequency-averaged loss factors by the power injection and the impulse response decay methods. J. Acoust. Soc. Am. 117 (1), January 2005.
16. Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция. Л. «Судостроение», 1986.
17. Грушецкий И. В., Смольников А. В. Определение коэффициентов энергетической связи двух балок с использованием МКЭ: вероятностный подход. Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2006, 10.