

УДК 534.833.5:286.2

Численное моделирование физического процесса прохождения звуковой волны через упругую пластину при оценке ее звукоизолирующей эффективности

Абдуллина Яна Александровна^{1(*)}

chavckina2015@yandex.ru

Попова Инесса Юрьевна²

popovainessa2905@gmail.com

SPIN-код: 6223-5192, Author ID: 1336083

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия имени А.Л. Штиглица, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы численного моделирования прохождения звуковой волны через препятствие в части количественной оценки его звукоизоляции. В качестве препятствия рассматривалась плоская упругая пластина в поле плоской волны и в диффузном поле. С использованием численных методов определены интенсивности падающей и отраженных волн, выполнены оценки звукоизолирующей эффективности пластины как препятствия на пути распространения звукового поля. Верификация полученных результатов выполнена с использованием известных инженерных методов оценки звукоизоляции для упругих пластин. Сделаны выводы об эффективности использования численных моделей для оценки звукоизоляции ограждающих конструкций.

Ключевые слова: звукоизоляция, акустическое поле, закон массы, критическая частота

Numerical modeling of the physical process of sound wave propagation through an elastic plate when assessing its soundproofing efficiency

Abdullina Yana Alexandrovna^{1(*)}

chavckina2015@yandex.ru

Popova Inessa Yuryevna²

popovainessa2905@gmail.com

SPIN-код: 6223-5192, Author ID: 1336083

¹Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Stieglitz State Academy of Art and Design, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Numerical modeling of sound wave propagation through an obstacle is considered, particularly for quantitative assessment of its sound insulation. A flat elastic plate in a plane wave field and a diffuse field is considered as the obstacle. Using numerical methods, the intensities of the incident and reflected waves are determined, and the sound insulation effectiveness of the plate as an obstacle to sound field propagation is estimated. The results are verified using established engineering methods for assessing the sound insulation of elastic plates. Conclusions are drawn regarding the effectiveness of numerical models for assessing the sound insulation of enclosing structures.

Keywords: sound insulation, acoustic field, law of mass, critical frequency

Введение. Снижение уровней техногенных шумов на пути их распространения является актуальной задачей в связи с постоянным ростом количества и мощности различных источников [1–3]. В прикладных задачах эффективность снижения может быть улучшена за счет постоянного совершенствования различных конструкций кожухов, акустических экранов, выгородок, звукоизолирующих перегородок между помещениями, звукопоглощающих покрытий. Эффективность любой звукоизолирующей конструкции определяется как отношение между интенсивностью падающей и прошедшей волны, которые не всегда могут быть измерены непосредственно на практике. Численное моделирование акустических полей и их взаимодействие с различными структурами является сложной прикладной задачей. Однако решение этой задачи на практике позволяет получить нетривиальные результаты прикладного характера, позволяющие совершенствовать средства акустической защиты или изменять пространственное распределение акустических полей. При этом результаты любого моделирования в обязательном порядке должны подвергаться проверке.

В прикладных расчетах оценки эффективности звукоизоляции конкретной конструкции удобно пользоваться инженерными методами, которые в деталях могут учитывать ее особенности, условия использования, а также тип источника шумов. Инженерные методы не всегда позволяют выполнить количественную оценку точнее нескольких дБ. Зачастую инженерные методы основаны на предположении, что акустическое поле описывается идеализированной плоской волной или идеализированным диффузным полем. Однако в целом для типовых и общеизвестных конструкций имеются обширные экспериментальные данные и многократно проверенные инженерные подходы, результаты которых не вызывают сомнения. Самой простой общеизвестной конструкцией, для которой в технической литературе досконально описан физический процесс прохождения звука, является тонкая упругая пластина. Здесь следует отметить, что в целом инженерные методы оценки звукоизоляции даже для сложных конструкций основаны на одних и тех же физических принципах прохождения волны через упругое препятствие, основой которой является именно теория однослойных пластин. Данное обстоятельство определило выбор конструкции для численного моделирования и методов проверки результатов для исследований, описанных в данной статье.

Методы и материалы. Ключевым физическим законом, на основании которого можно верифицировать разрабатываемую численную модель, можно считать известную формулу классической теории звукоизоляции, одновременно, инженерных методов. Лорд Рэлей [4] первым в XIX веке сформулировал самое известное в теории звукоизоляции выражение, получившее собственное наименование — «закон массы» (звукоизоляция увеличивается с ростом частоты на 6 дБ/октава и не зависит от величины внутренних потерь). Впоследствии, с учетом угла падения волны на пластину вид формулы получи известный вид:

$$R(f) = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega m \cos \vartheta_0}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

ϑ_0 — угол падения плоской волны на пластину, ρ_0 — плотность акустической среды, c_0 — скорость звука в акустической среде, $m = \rho_{\text{пл}} h$ — погонная массы пластины, $\rho_{\text{пл}}$ — плотность материала пластины, h — толщина пластины, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, f — частота (в приведенной записи формулы акустическая среда учитывалась с двух сторон пластины).

В работах Рэлея не рассматривалось влияние угла падения на величину звукоизоляции. Здесь можно отметить работы Л. Кремера [5], который первым последовательно описал весь процесс прохождения волны через бесконечную пластину. При косом падении звуковой волны на пластину «закон массы» хорошо работает в диапазоне частот $f < 0,5 f_{\text{кр}}$ ($f_{\text{кр}}$ — критическая частота, определяемой как отношение между скоростью звуковых волн в среде и возникающих изгибных волн в пластине). Влияние изгибных волн требует учета коэффициентом внутренних потерь материала η , из которого изготовлена пластина. Теория по Л. Кремеру предписывает, что на частоте волнового совпадения ($f_0 = f_{\text{кр}} / \sin^2 \vartheta_0$) должно выполняться условие для минимума звукоизоляции:

$$R(f) = 10 \lg \left[1 + \eta \frac{\omega m \cos \vartheta_0}{2 \rho_0 c_0} \right]. \quad (2)$$

Очевидным следствием из (2), является эффект «полного» прохождения звука через пластину без потерь на частоте совпадения. На частотах, большей частоты волнового совпадения звукоизоляция растет по закону превышающему рост в рамках закона массы. В диапазоне $f > 2 f_{\text{кр}}$ для звукоизоляции существуют различные асимптотические выражения. Зачастую в этих выражениях учитывается условия закрепления для ограниченных пластин и другие факторы. В рамках модели безграничной пластины в работе использовалось выражение звукоизоляции, полученное на основании теории Л. Кремера. Для диапазона $f > 2 f_{\text{кр}}$ асимптотика для звукоизоляции имеет вид

$$R(f) = 20 \lg \left[\left(\frac{\omega m \cos \vartheta_0}{2 \rho_0 c_0} \right) \left(\frac{f}{f_{\text{кр}}} \right)^2 \sin^4 \vartheta_0 \right]. \quad (3)$$

Наиболее общее аналитическое выражение для количественной оценки звукоизоляции может быть записано в следующем виде:

$$R(f) = 10 \lg \left\{ \left[1 + \eta \frac{\omega m \cos \vartheta_0}{2 \rho_0 c_0} \left(\frac{f}{f_{\text{кр}}} \right)^2 \sin^4 \vartheta_0 \right]^2 + \left(\frac{\omega m \cos \vartheta_0}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{f}{f_{\text{кр}}} \right)^2 \sin^4 \vartheta_0 \right]^2 \right\} \quad (4)$$

Выражение (4) следует считать основным выражением для верификации результатов, полученных на численной модели.

Результаты. На рис. 1 приведена численная модель плоской бесконечной пластины. Модель представляла собой отдельную ячейку размером $[a, b]$ в плоскости XU , выделенную из поверхности пластины и окружающей акустической среды с обеих сторон пластины (нормаль к поверхности пластины направлена по оси Z).

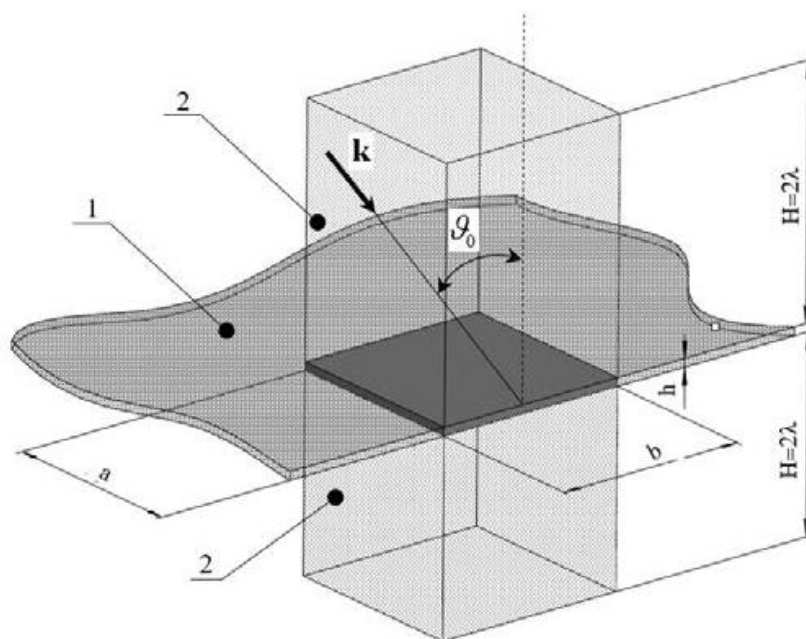


Рис. 1. Модель отдельной ячейки, выделенная на поверхности бесконечной пластины:
1 — моделируемая упругая пластина, 2 — акустическая среда (воздух)

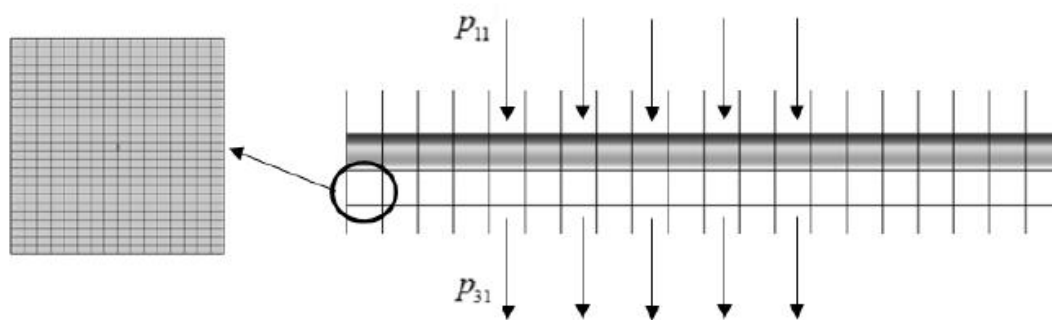


Рис. 2. Колебания пластины $h = 3$ мм при нормальном падении плоской волны на частоте $f = 12\,000$ Гц

Самой простой проверкой является случай нормального падения плоской волны. В этом случае изгибная волна не возникает, пластина колеблется как единое целое, звукоизоляция описывается «законом массы» во всем частотном диапазоне (1). Пример расчета на частоте $f = 12\,000$ Гц показан на рис. 2. Для наглядности показаны двадцать граничащих между собой сегментов пластины и конечноэлементная сетка для расчетного сегмента. Здесь p_{11} — падающая волна, p_{31} — прошедшая волна.

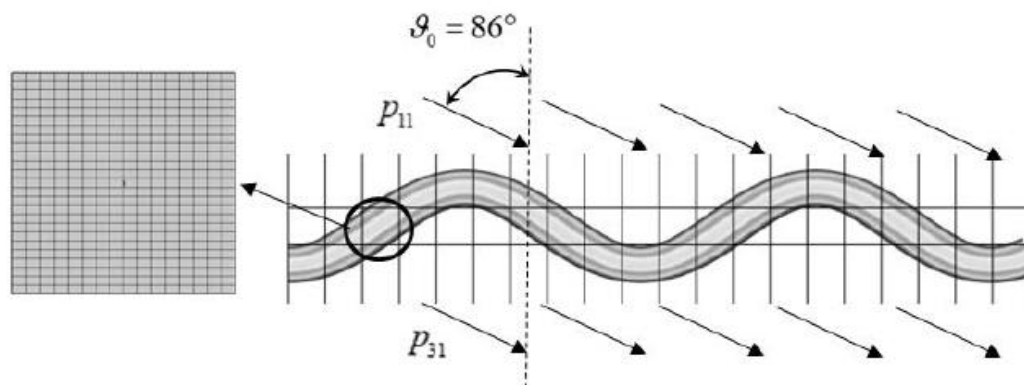


Рис. 3. Колебания пластины $h = 3$ мм при косом падении плоской волны под углом $\vartheta_0 = 86^\circ$ на частоте $f = 12\,000$ Гц

На рис. 3 показан процесс в тонкой пластине при падении на ее поверхность звуковой волны под углом $\vartheta_0 = 86^\circ$ на частоте $f = 12\,000$ Гц. Для наглядности показаны двадцать граничащих между собой сегментов пластины и конечноэлементная сетка для расчетного сегмента $a = 3$ мм. Результат позволяет оценить длину и скорость изгибных волн. Отношение между p_{11} — падающей волной, p_{31} — прошедшей волной можно оценить по формуле (4) во всем частотном диапазоне.

Обсуждение. Описанная численная модель позволяет рассчитывать амплитуду прошедшей и отраженной акустических волн и упругие колебания пластины. Пример расчетов звукоизоляции для частного случая падения плоской волны под углом $\vartheta_0 = 60^\circ$ на тонкую пластину толщиной $h = 3$ мм проведен на рис. 4. Расчет выполнялся для двух значений внутренних потерь $\eta_1 = 0,01$ и $\eta_2 = 0,1$.

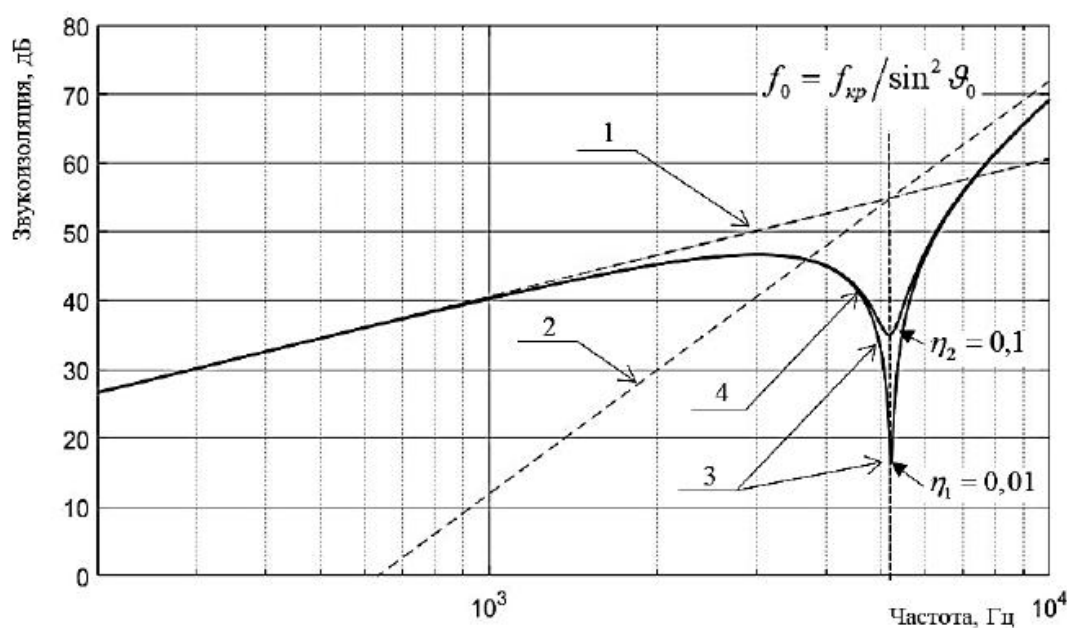


Рис. 4. Частотные зависимости звукоизоляции, рассчитанные по формулам (1)–(4) теории Л. Кремера (пунктирные линии 1–4) и численной модели (сплошная линия)

Из выполненных расчетов (рис. 4) видно хорошее совпадение результатов полученных из расчетов по аналитическим выражениям теории Л. Кремера и численным моделированием. Следует отметить, что результаты звукоизоляции тонкой бесконечной пластины, полученные по формуле (4) в точности совпадают с результатами численного моделирования. Такое совпадение сохраняется на всех частотах и углах падения, при которых пластину можно считать «тонкой» согласно существующему критерию теории изгибных колебаний пластин.

Заключение. Количественная оценка уровней акустического поля излучаемого или поглощаемого какой-либо конструкцией является нетривиальной задачей даже с учетом возможностей современных численных методов. Учет необходимого количества факторов, определяющих конечный результат, является основой достоверной численной модели. В статье описан опыт оценки звукоизоляции тонкой упругой пластины на численной модели, который может быть использован при решении прикладных задач с более сложной геометрией. В статье на выбранном примере показано, что достоверный результат, согласующийся с классическим описанием физического процесса прохождения звуковой волны через упругую пластину, был получен для всех рассматриваемых частот и углов падения без значимых погрешностей.

Список источников

- [1] Никифоров А.С. *Акустическое проектирование судовых конструкций: справочник*. Ленинград, Судостроение, 1990, 200 с.
- [2] Боголепов И.И. *Промышленная звукоизоляция*. Ленинград, Судостроение, 1986, 368 с.
- [3] Бобылев В.Н., Тишков В.А., Монич Д.В. *Изоляция воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями*. Н. Новгород, ННГАСУ, 2014, 67 с.
- [4] Рэлей Джон Вильям Стрэтт. *Теория звука*. Т. 2. Москва, ГИТТЛ, 1955.
- [5] Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schragem Einfall. *Akustische Zeitschrift*, 1942, b. 7, № 3, s. 81–104.