

И. В. Грушецкий, А. В. Смольников

Крыловский государственный научный центр

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

Плотность частот свободных колебаний помещения, заполненного оборудованием

Получена 07.11.2012, опубликована 12.12.2012

Частоты и плотности частот свободных колебаний пустого и частично заполненного оборудованием помещения в форме прямоугольного параллелепипеда рассчитаны с использованием МКЭ и по известной простой формуле. Сделан вывод о возможности расчёта плотности частот частично заполненного помещения по простой формуле, но входящие в формулу объём и площадь ограждений помещения следует рассчитывать с учётом объёма и площади поверхности установленного в помещении оборудования.

Ключевые слова: архитектурная акустика, помещение, частоты свободных колебаний, плотность частот свободных колебаний, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространённым методом расчёта звука и вибрации сложных инженерных конструкций (судов, автомобилей, самолётов, зданий и проч.) в звуковом диапазоне частот является статистический энергетический метод (СЭМ). Основы метода изложены в многочисленных монографиях и статьях, в том числе, российских учёных [1–4]. Метод внедрён в зарубежную практику в виде коммерческих программ. Первым примером применения СЭМ в отечественной инженерной практике является методика расчёта уровней шума в судовых помещениях [5], разработанная ещё в 70-е годы прошлого века.

Наряду с другими исходными данными в СЭМ используются плотности частот свободных колебаний подсистем. Известны выражения для плотности частот балки, плоской пластины, замкнутого объёма элементарной формы (прямоугольный параллелепипед, сфера, цилиндр) и некоторых других простых элементов, применяемых зачастую для аппроксимации более сложных конструкций. Реальные судовые конструкции и помещения в значительной степени отличаются от их «идеальных» представлений или аппроксимаций. Например, наиболее распространённые судовые корпусные и внутрикорпусные конструкции представляют собой пластины, подкреплённые рёбрами жёсткости. На конструкции может быть установлено разнообразное оборудование, трубопроводы, кабели и прочее насыщение, а также они могут иметь вырезы. Очевидно, что частоты свободных колебаний таких

реальных конструкций отличаются от частот плоской однородной пластины. Однако было обнаружено [6], что *плотности* частот свободных колебаний однородной плоской пластины и той же пластины, но с массой, отверстием, рёбрами жёсткости примерно одинаковы, если в полосе содержится хотя бы несколько таких частот. Следствием этого является возможность применения для расчёта плотности частот сложных конструкций простой формулы, которая получена для однородных плоских пластин и не учитывает насыщение и другие особенности реальных конструкций.

Помещения обычно заполнены оборудованием, мебелью и прочим насыщением, могут иметь сложную форму. Очевидно, что частоты свободных колебаний таких помещений отличаются от частот пустого помещения, которые рассчитываются по простым формулам. В данной статье представлены оценки частот и плотности частот свободных колебаний объёма в форме прямоугольного параллелепипеда с жёсткими стенками и этого же объёма, но частично заполненного телом кубической формы (рис. 1) — макетом оборудования. Такая модель позволяет получить представление о частотах и плотности частот свободных колебаний помещения с насыщением в сравнении с пустым помещением. Расчёты выполнены как методом конечных элементов (МКЭ), так и по известным простым формулам. На этом примере показано, что плотность частот в диапазоне применения СЭМ можно приближённо оценить по простым формулам.

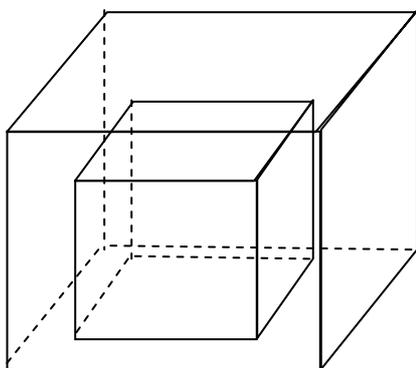


Рис. 1.

Помещение, частично заполненное телом кубической формы (макетом оборудования) — модель помещения с насыщением

1. СПОСОБЫ РАСЧЁТА

Частоты свободных колебаний пустого помещения рассчитывались по известной формуле

$$f_{ijk} = \frac{c_0}{2} \left(\left(\frac{i}{a} \right)^2 + \left(\frac{j}{b} \right)^2 + \left(\frac{k}{c} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где c_0 — скорость звука в среде (в воздухе), a , b , c — габаритные размеры помещения; $i, j, k = 0, 1, 2, \dots$

Частоты свободных колебаний частично заполненного (а также пустого) помещения, рассчитывались по стандартной процедуре МКЭ. Отметим, что значения частот пустого помещения, рассчитанные с использованием формулы (1) и МКЭ совпадали.

Плотность частот свободных колебаний определялась двумя способами:

1. Путём подсчёта числа частот, рассчитанных с использованием МКЭ, в границах третьоктавных полос с последующим делением на ширину полосы

2. По приближённой формуле

$$n = \frac{4\pi f^2 V}{c_0^3} + \frac{\pi f S}{2c_0^2} + \frac{L}{8c_0}, \quad (2)$$

где $V = abc$ — объём помещения; $S = 2(ab + bc + ca)$ — площадь ограждений; $L = 4(a + b + c)$ — длина рёбер помещения.

Целью расчётов являлась оценка применимости формулы (2) для частично заполненного помещения путём сопоставления значений плотности частот свободных колебаний, полученных по приближённой формуле и с использованием МКЭ. Расчёты МКЭ выполнялись в диапазоне частот до 400 Гц включительно, ограниченном производительностью используемого компьютера.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА

Размеры помещения в форме прямоугольного параллелепипеда приняты $6 \times 5 \times 4$ м (длина \times ширина \times высота). Оборудование в помещении моделируется кубом с жёсткими стеками — макетом оборудования (рис. 1), объём которого составляет 10, 20 или 30% от объёма помещения. При этом длина стороны куба составляет 2.29, 2.88 и 3.30 м соответственно.

При расчёте по формуле (2) оборудование учитывалось следующим образом:

1. Объём помещения V уменьшался на объём оборудования (куба),
2. Площадь ограждений S увеличивалась на площадь поверхности оборудования,
3. Длина рёбер L увеличивалась на длину рёбер оборудования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

Число частот свободных колебаний частично заполненного помещения, рассчитанных с использованием МКЭ, представлено в таблице 1. Видно, что при увеличении размеров макета оборудования (уменьшении свободного объёма) снижаются и первая частота свободных колебаний и число частот в полосах на высоких частотах исследованного диапазона. Т.е. заполнение приводит к тем же изменениям, что и удлинение помещения с одновременным уменьшением его объёма.

Число частот в полосах и плотность частот быстро увеличиваются с повышением частоты. Поэтому для улучшения графического восприятия результатов расчёта на рисунках представлена плотность частот, делённая на частоту.

На рис. 2 представлена плотность частот свободных колебаний помещения с макетом оборудования, рассчитанная МКЭ и по приближённой формуле (2), в которой,

как указывалось, объём помещения уменьшен на объём оборудования, площадь ограждений увеличена на площадь поверхности оборудования, а длина рёбер увеличена на длину рёбер оборудования. Видно, что приближённая формула учитывает фактические тенденции.

На рис. 3 представлены расчёты плотности частот с использованием МКЭ и по приближённой формуле (2) для разного заполнения помещения. Приближённая формула для плотности частот (2) даёт удовлетворительные результаты, начиная с самых низких частот — с частотных полос, в которых содержится хотя бы две частоты свободных колебаний (в данном случае 40 Гц).

Из рис. 3а также видно, что результаты расчётов МКЭ и по точной формуле (1) для пустого помещения практически одинаковы. Малое различие заметно на частоте 400 Гц. Оно связано с увеличением погрешности МКЭ из-за размеров элементов, ограниченных производительностью используемого компьютера. Поэтому на более высоких частотах расчёты не выполнялись.

Таблица 1. Число частот свободных колебаний помещения в третьоктавных полосах частот (расчёт МКЭ)

частота, Гц	объём макета оборудования			
	0	10%	20%	30%
16	0	0	0	0
20	0	0	1	1
25	1	1	1	1
31	1	1	0	0
40	2	2	2	2
50	3	3	3	3
63	4	4	5	5
80	9	9	9	10
100	14	14	15	15
125	29	29	26	24
160	53	52	50	44
200	98	95	89	84
250	182	172	161	149
315	357	330	311	286
400	682	632	578	535
500	1250	1150	1065	952

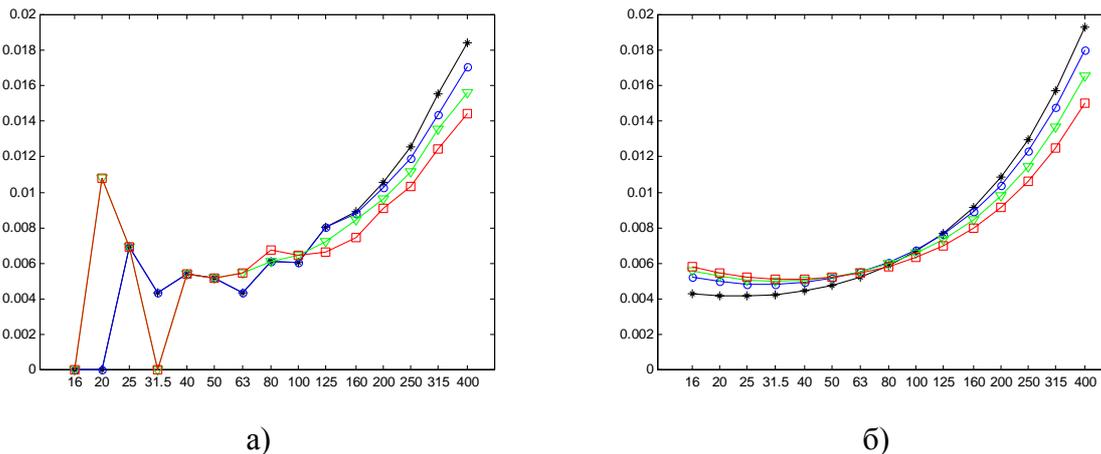


Рис. 2. Плотность частот свободных колебаний помещения (делённая на частоту):
 а) точный расчёт МКЭ; б) приближенный расчёт по формуле (2):
 * — пустое помещение, \circ , ∇ , \square — помещение с макетом оборудования, заполняющего
 помещение на 10, 20 и 30% соответственно

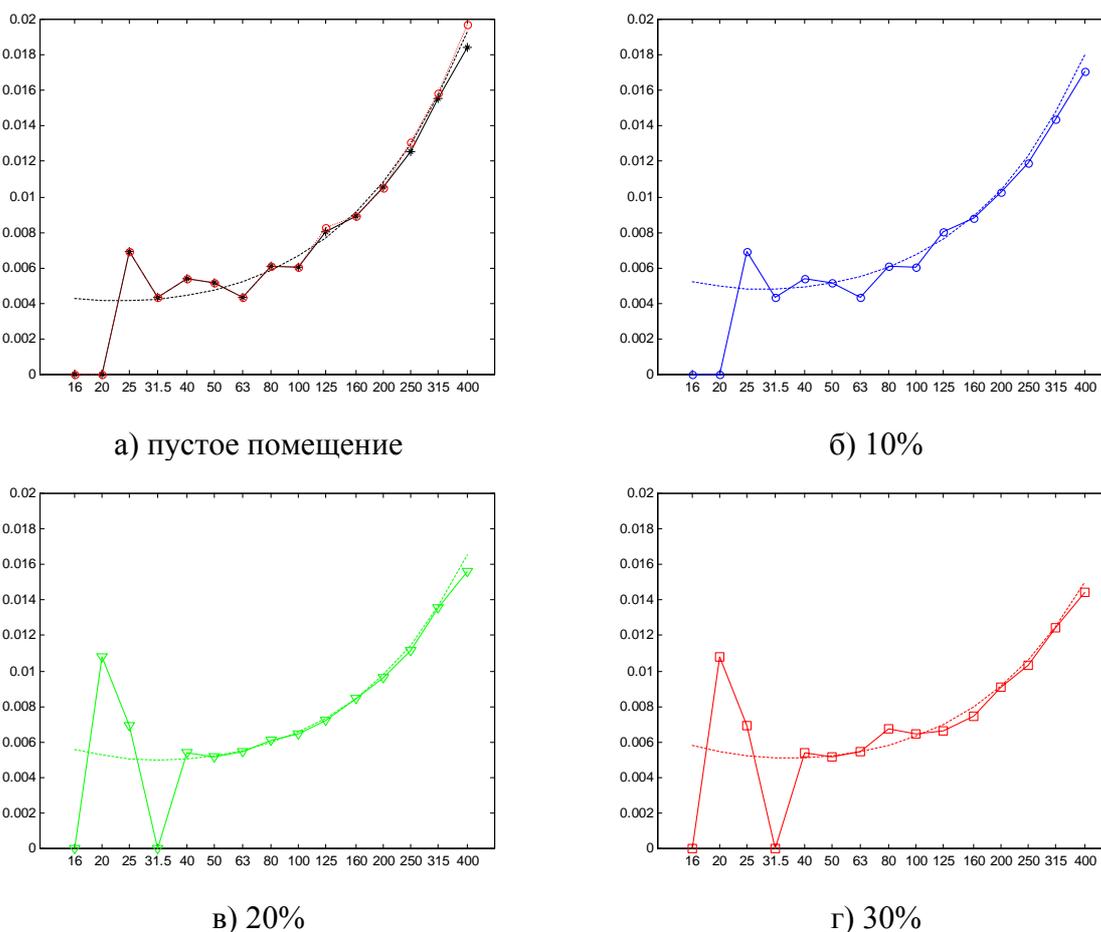


Рис. 3. Плотность частот свободных колебаний помещения (делённая на частоту),
 а...г — расчётные модели: *, \circ , ∇ , \square — точный расчёт МКЭ; пунктир —
 приближенный расчёт по формуле (2); \circ на рис. (а) — расчёт по формуле (1)

4. ПРИБЛИЖЁННАЯ ФОРМУЛА

На рис. 4 для помещения, заполненного на 30%, дополнительно представлены расчёты по часто используемой «усечённой» формуле (2):

$$n \approx \frac{4\pi f^2 V}{c_0^3}, \quad (3)$$

которая не учитывает форму помещения. Видно, что неучёт площади ограждений помещения и оборудования заметно снижает точность расчёта во всём исследованном диапазоне, неучёт рёбер — только на низких частотах и к тому же незначительно. Т.е. «плотно» заполненное помещение является фактически сильно несоразмерным, и для расчёта плотности частот не следует использовать приближённую формулу (3). Однако последнее слагаемое в формуле (2), как показывают расчёты, можно не учитывать: Такое упрощение практически важно, поскольку насыщение зачастую имеет сложную форму, в которой невозможно выделить какие-либо рёбра. При этом объём и площадь могут быть определены, хотя бы приближённо, всегда.

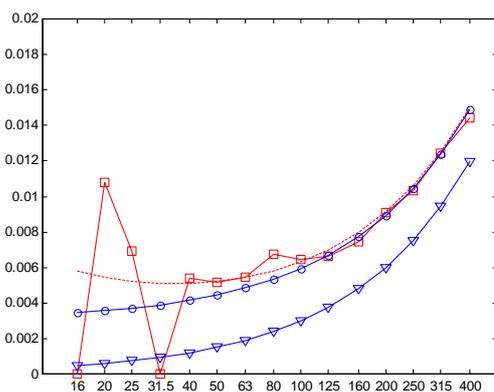


Рис. 4.

Плотность частот свободных колебаний помещения, заполненного макетом оборудования на 30%:

- — точный расчёт МКЭ;
- — приближенный расчёт по формуле (2),
- — без последнего слагаемого в форм. (2),
- ▽ — только 1-е слагаемое в форм. (2) или форм. (3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реальные помещения отличаются от их упрощённых моделей — пустых помещений простой геометрической формы, зачастую используемых для расчётов, весьма многообразным насыщением в виде оборудования, мебели и проч. Наличие насыщения приводит к отличию значений частот свободных колебаний реальных помещений и упрощённых моделей. В результате выполненного расчётного исследования обнаружено, что *плотности* частот свободных колебаний частично заполненного помещения можно оценить по простой формуле для пустого помещения, но входящие в формулу объём, площадь ограждений и длину рёбер помещения следует рассчитывать с учётом объёма, площади ограждений и длины рёбер установленного в помещении оборудования. При этом можно пренебречь длиной рёбер, что упрощает расчёт, если оборудование имеет сложную форму. Расчёт по приближённой формуле практически совпадает с точным расчётом, использующим МКЭ, если в полосе частот содержится

хотя бы несколько частот свободных колебаний, т.е. в диапазоне применения СЭМ. Такой вывод сделан на основе рассмотрения нескольких примеров, но нет оснований полагать, что более сложное насыщение окажет принципиально иное влияние на плотность частот свободных колебаний частично заполненных помещений в области применения СЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А. С., Будрин С. В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л.: Судостроение, 1968.
2. Никифоров А. С. Вибропоглощение на судах. Изд. «Судостроение», Л.: 1979.
3. Бородинский Л. С., Спиридонов В. М. Снижение структурного шума в судовых помещениях. Л., «Судостроение», 1974.
4. Овсянников С. Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета. Томск, 2000.
5. Расчет уровней шума в судовых помещениях. Методика. ОСТ 5.0173-75, 1975.
6. Грушецкий И. В., Смольников А. В. Плотность частот свободных колебаний судовых конструкций. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2013 (в печати).