

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОКОН

© 2014 В.Ю. Кирпичников¹, Л.Ф. Дроздова², Д.В. Ляпунов¹, А.В. Кудяев²¹ ФГУП Крыловский Научный Центр, г. Санкт-Петербург² Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова (Военмех), г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 13.01.2014

В статье экспериментально и теоритически исследовано влияние резонансов изгибных колебаний в стеклах на прохождение звука через окна. Наличие максимумов в спектрах вибровозбудимости стекол подтвердили наличие в стеклах изгибных резонансов. Анализ полученной расчетной информации показал, что многие расчетные значения резонансных частот изгибных колебаний стеклопакетов находятся в частотных диапазонах минимальной условной звукоизоляции окна. Проведенные исследования подтвердили значимость влияния резонансных явлений в элементах остекления окон на прохождение через них звукового сигнала.

Ключевые слова: структурный шум, моделирование, рельс, колесо

Эффективным методом снижения шума на пути его распространения является звукоизоляция ограждающих источник шума конструкций. Листовые конструкции, составляющие звукоизолирующие перегородки, двери, окна помещений, снижают уровень шума за счет отражения и рассеяния звуковой энергии. Механизм прохождения звука материал ограждающих конструкций заключается в том, что под действием падающих звуковых волн ограждение приводится в колебательное движение и само начинает излучать звук. По созданной Л.Кремером [1] теории собственной звукоизоляции тонкой пластины необходимо учитывать явления волнового совпадения. Поэтому важно иметь информацию о влиянии на звукоизоляцию ограниченной пластины возникающих в ней резонансных явлений.

Звукоизоляцию ограждающих конструкций задают ее значениями в октавных полосах частот преимущественно от 63 до 8000 Гц, либо индексом изоляции воздушного шума, вычисление которого проводят с использованием значений звукоизоляции в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 100 до 3150 Гц.

Стекла окон и дверей являются, как правило, наиболее слабыми звукоизолирующими элементами ограждающих конструкций помещений. Результаты исследований их звукоизоляции приводятся во многих работах, [2–6].

Кирпичников Валерий Юлианович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: sotnik26@bk.ru

Дроздова Людмила Филипповна, кандидат технических наук, профессор. E-mail: drozdovalf@yandex.ru

Ляпунов Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: norushka@rol.ru

Кудяев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: Ksiombarg1@yandex.ru

Авторами было выполнено экспериментальное исследование влияния резонансов изгибных колебаний в стеклах на прохождение шума через окна из помещений на улицу. Звукоизоляция наружной стены зданий, где находились помещения, в которых проводились исследования, была много больше звукоизоляции окон.

Были исследованы 15 однокамерных стеклопакетов пяти окон в трех различных помещениях.

На начальном этапе работы были измерены спектры вибровозбудимости стеклопакетов при ударе вибромолотком. (Под вибровозбудимостью подразумевалась величина виброускорения в дБ относительно 10^{-6} м/с², нормированная возбуждающей силой $20 \lg F/F_0$, где $F_0 = 1$ Н).

Типовые узкополосные ($\Delta f = 0,7$ Гц) спектры вибровозбудимости стекол одной из стеклопакетов приведены на рис. 1. Измерения выполнялись на внутреннем стекле (ти2). Возбуждались ударом последовательно внутреннее (тв1) и наружное (тв1') стекла стеклопакета. Из рисунка видно, что спектры вибровозбудимости стекла содержат большое число максимумов.

Была произведена идентификация форм изгибных колебаний внутреннего стекла стеклопакета на низших частотах максимумов.

Номера форм колебаний (m и n – числа полуволн вдоль длинной и короткой сторон) приведены в таблице 1. Там же указаны измеренные значения собственных частот и частот максимумов в спектрах вибровозбудимости. (Их некоторое различие обусловлено рядом факторов, в том числе положением стеклопакетов, открыто–закрыто, точностью считывания частот и т.д.).

Был сделан вывод, что наличие максимумов в спектрах вибровозбудимости связано с возникновением в стеклах изгибных резонансов.

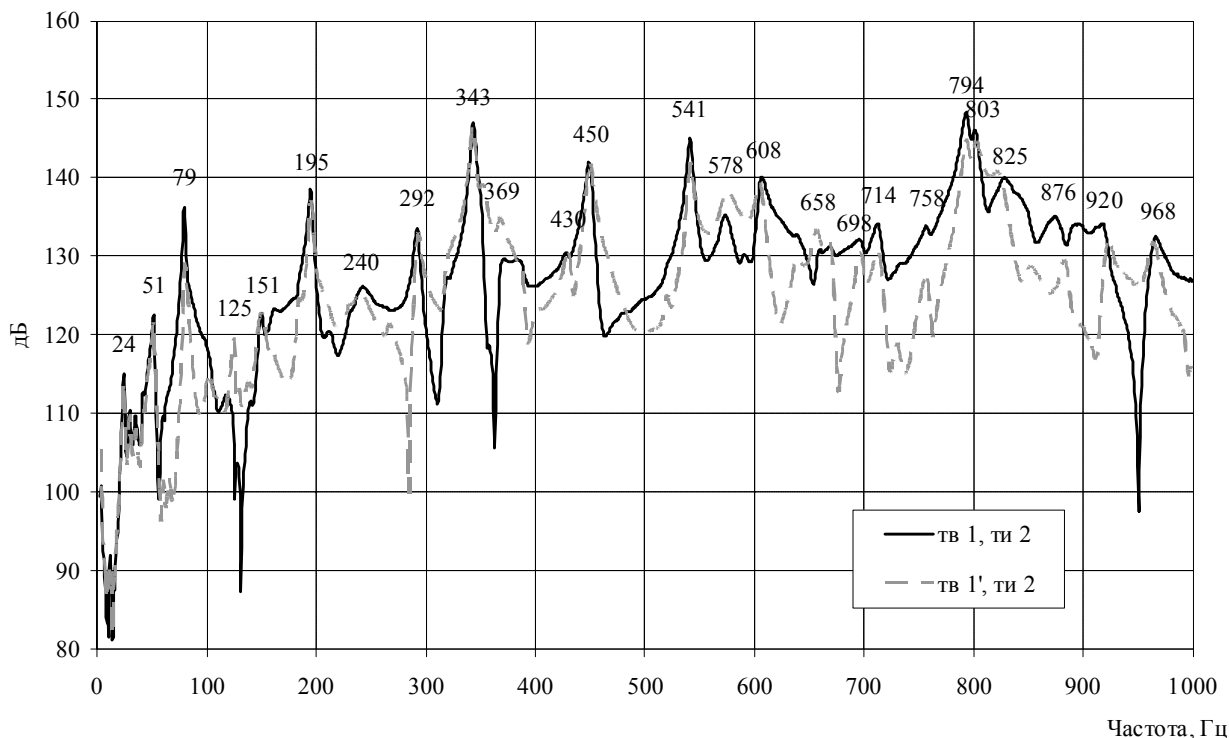


Рис. 1. Типовые узкополосные ($Df = 0,7$ Гц) спектры вибровозбудимости стекол стеклопакета

Таблица 1. Номера форм колебаний

Форма колебаний		Собственные частоты, Гц	Частоты максимумов, Гц
m	n		
1	1	24	24
2	1	45	51
3	1	79	79–81
4	2	124	125
–	2	152	151–152
4	–	201	195

Значения резонансных частот четырех стеклопакетов одного из испытанных окон сведены в табл. 2. Там же приведены условные диапазоны нахождения этих частот и их число в каждом из диапазонов. Общее число обнаруженных резонансных частот стекол окна в диапазоне, ограниченном сверху частотой 1 кГц, составило 150.

Узкополосные частотные характеристики условной звукоизоляции окна (разницы, по трем парам точек измерения, уровней звукового давления в помещении и на улице) изображены на рис. 2 и 3.

На обоих рисунках приведены частоты минимальной звукоизоляции, большинство из которых, как показал анализ, попадает в условные диапазоны резонансных частот стекол стеклопакетов или совпадает с этими частотами (с учетом погрешности их определения).

Результаты измерений были подтверждены расчетами собственных частот изгибных колебаний стекол стеклопакетов. Расчеты собственных частот f_{mn} изгибных колебаний отдельного стек-

ла производились по формуле [7]:

$$f_{mn} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{Eh^2}{3\rho(1-\sigma^2)}} \left(\left(\frac{m}{\ell_1 \zeta_m} \right)^2 + \left(\frac{n}{\ell_2 \zeta_n} \right)^2 \right) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B_{cm}}{m_{cm}}} \left(\left(\frac{m}{\ell_1 \zeta_m} \right)^2 + \left(\frac{n}{\ell_2 \zeta_n} \right)^2 \right) \quad (1)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ и $n = 1, 2, 3, \dots$; ℓ_1 – длина стекла, м; ℓ_2 – ширина стекла, м;

$$B_{cm} = EI = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} - \text{изгибная жест-}$$

кость стекла;

E – модуль Юнга стекла, $E = 6 \cdot 10^{10}$ Па;

$$I = \frac{h^3}{12(1-\sigma^2)} - \text{момент инерции пластины;}$$

h – толщина стекла, м;

Таблица 2. Значения резонансных частот четырех стеклопакетов одного из испытанных окон

Резонансные частоты, Гц				Условные диапазоны, Гц, и число резонансных частот, Гц
Стеклопакет 1	Стеклопакет 2	Стеклопакет 3	Стеклопакет 4	
24	23; 27; 34	28	24; 31	23–31; 4
51	44; 52	46; 51	40; 54; 60	40–60; 6
79–81	75; 79	80	–	75–80; 3
125	101; 118; 128	103; 126	104; 135	101–135; 8
151–152	153; 154	159	158	151–158; 6
195	165; 179; 204	197	174; 184	165–204; 7
228	223; 235; 241	231	213	213–241; 6
240–244	–	–	241; 256	240–256; 4
292	296	287	280; 294	280–296; 5
343–344	318; 320; 336; 344	326; 345	311; 339	311–344; 9
367–369	376	–	364	364–376; 4
385	–	380	392	380–392; 3
430	418; 419	431	419; 443	418–443; 5
450	459; 471; 472	453	460; 480	450–480; 7
541–542	519; 520; 542	521; 545	533; 557	519–557; 8
574–578	580; 587	589	573	573–589; 6
608	604; 632	606	613; 637	604–637; 6
658–660	666	641; 659; 669	688	641–688; 7
693–698	–	–	698	693–698; 2
712–714	–	707	718	707–718; 4
758	748; 751; 768; 771	764	752	748–771; 7
793–794	792	–	788	788–794; 4
802–803	804; 805	800; 807	806	800–807; 7
825–830	818	820	835	818–835; 5
876	867; 875	854; 875	884	854–884; 5
920–922	933; 935	905	902; 945	902–945; 7
967–968	958; 961	968	–	958–968; 4
–	–	–	986	986; 1

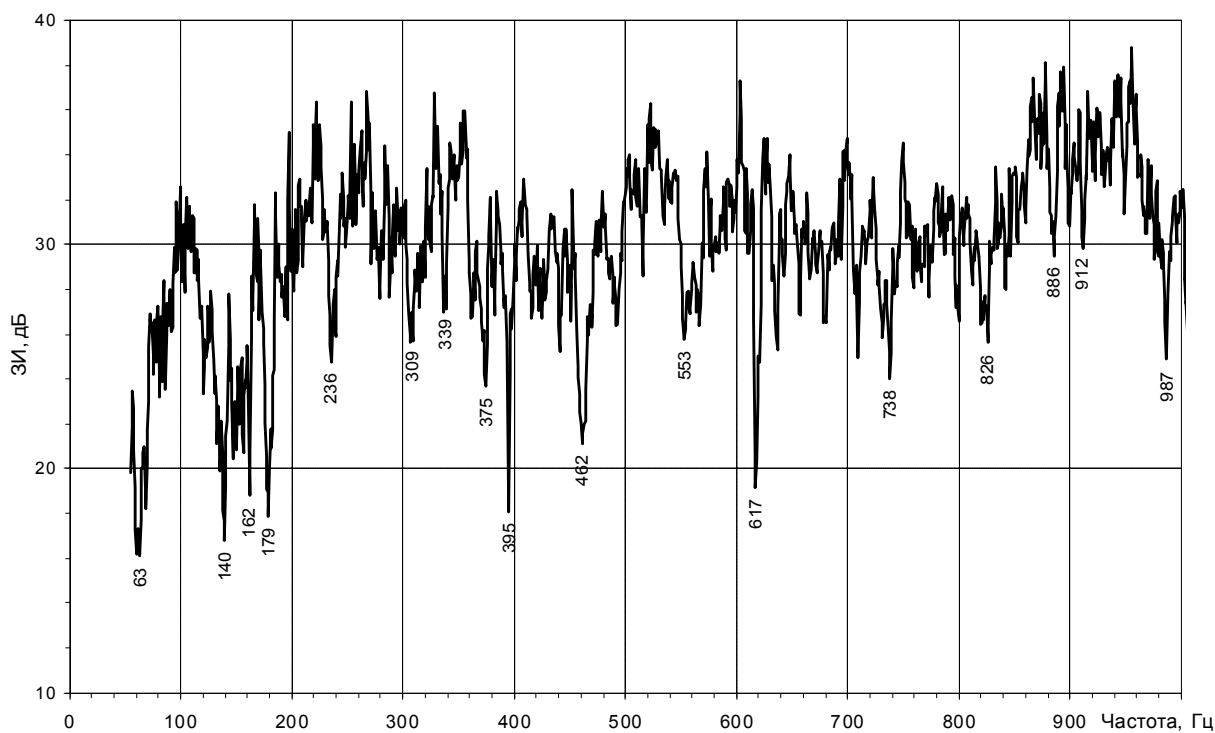


Рис. 2. Частотная характеристика условной звукоизоляции окна

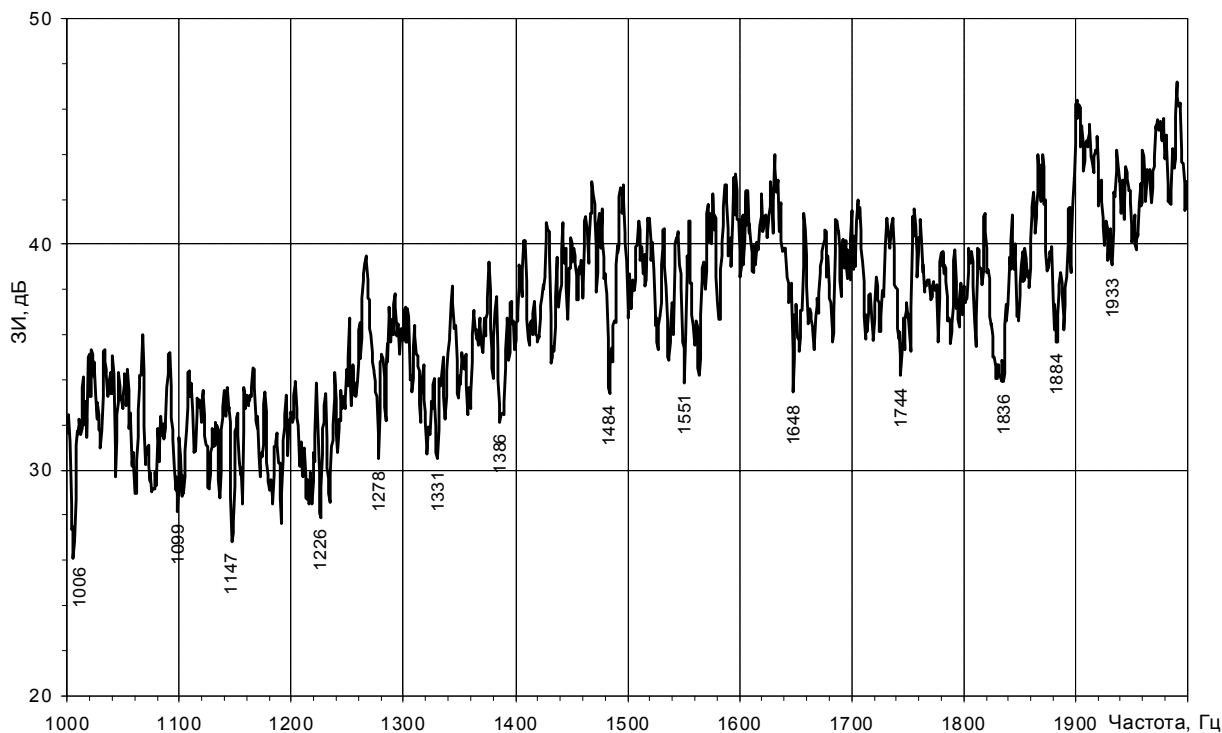


Рис. 3. Частотная характеристика условной звукоизоляции окна

σ – коэффициент Пуассона стекла, с учетом отсутствия надежных данных принимался в расчетах равным нулю;

$m_{cm} = \rho h$ – масса единицы поверхности стекла;

ρ – плотность стекла, $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$;

$$\zeta_m = \frac{d}{1 + 0,23/m} \text{ и } \zeta_n = \frac{d}{1 + 0,23/n},$$

d – коэффициент, учитывающий степень защемления пластины (при свободном опирании $d = 1,11$; при защемленных кромках $d = 1$).

Вычислялась также резонансная частота каждого стеклопакета, состоящей из двух элементов с воздушным промежутком [1]:

$$f_p = 85 \sqrt{\frac{1}{d_1} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}, \quad (2)$$

где d_1 – ширина воздушного промежутка, м;

m_1 и m_2 – массы единицы поверхности отдельных стекол, кг/м^2 .

Критическая частота колебаний стекла в воздухе рассчитывалась по формуле

$$f_{кр} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{cm}}{B_{cm}}}. \quad (3)$$

Результаты расчетов резонансных частот изгибных колебаний одного из стеклопакетов окна с размерами в плане $1,05 \times 2,00 \text{ м}$ (рис. 4) приведены в табл. 3. Там же приведены размеры стекло-

пакета и определенные с использованием измерений частоты минимальной условной звукоизоляции окна.

Расчетные значения резонансных частот изгибных колебаний всех стеклопакетов, близких к частотам минимальной условной звукоизоляции окна, приведены на рис. 5 и 6.

На этих же рисунках показаны расчетные значения резонансных частот стеклопакетов ($f_p = 300,5 \text{ Гц}$) и критической частоты стекла ($f_{кр} = 3121 \text{ Гц}$). На рисунках изображена также расчетная частотная характеристика условной звукоизоляции окна.

Анализ полученной информации подтвердил, что многие расчетные значения резонансных частот f_{mn} изгибных колебаний стеклопакетов находятся в частотных диапазонах минимальной условной звукоизоляции окна. Минимальная звукоизоляция окна зарегистрирована и вблизи расчетных значений резонансной частоты испытанных стеклопакетов f_p и критической частоты стекла $f_{кр}$.

О значимом влиянии резонансных явлений в стеклах на прохождение звука через окна свидетельствовало и сопоставление частотных характеристик спектров виброускорения (схема точек на рис. 4) озвучиваемых стекол и когерентности виброускорения со звуковым давлением.

На рис 7 и 8 изображен спектр (0–250 Гц) виброускорения наружного стекла одной из стеклопакетов и спектр указанной когерентности.

Видим, что некоторые частоты максимумов в

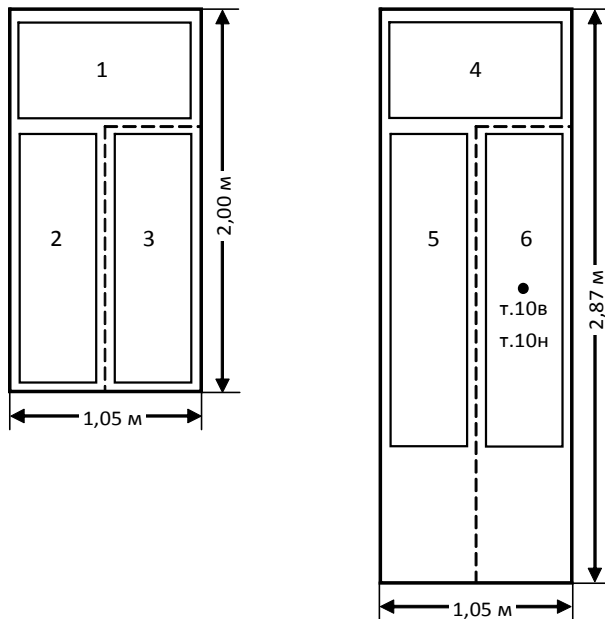


Рис. 4. Схема измерительных точек окна
 • т.10в, т.10н – точки измерения вибрации внутреннего и наружного стекла, соответственно

спектрах когерентности близки к частотам максимумов в спектрах виброускорения. Число максимумов в спектрах виброускорения меньше числа максимумов в спектрах когерентности, так как виброприемник находился в геометрическом центре стекол стеклопакета, т.е. в пучности только нечетно-четных форм их изгибных колебаний.

К основным результатам выполненного ком-

плекса исследований по выявлению причин снижения условной звукоизоляции окон можно отметить следующие:

- в спектрах вибровозбудимости стекол окон содержится большое число максимумов резонансного происхождения (в диапазоне, ограниченном сверху частотой 1600 Гц, в спектрах вибровозбудимости пятнадцати обследованных однокамерных стеклопакетов зарегистрировано от 72 до 150 резонансных максимумов). Поддиапазоны с резонансными частотами изгибных колебаний стекол окон занимают значительную часть частотной области измерений.

- экспериментально зарегистрированные частоты минимальной звукоизоляции (ЗИ) окон, как правило, находятся в поддиапазонах резонансных частот (f_{mn}) их изгибных колебаний, рассчитанных для случаев свободного опирания ($\min f_{mn}$) и жесткой заделки ($\max f_{mn}$) кромок стекол.

- расчетные значения звукоизоляции по закону массы удовлетворительно совпадают с измеренными значениями звукоизоляции окон лишь на редких частотах диапазона ограниченного сверху частотой около 500 Гц (примерно 0,16 $f_{кр}$); на большинстве частот расчетные значения ЗИ превышают измеренные значения; наиболее вероятной причиной такого соотношения является уменьшение звукоизоляции окон, связанное с возникновением резонансных явлений в элементах остекления; превышение расчетных значений ЗИ окон над измеренными значениями

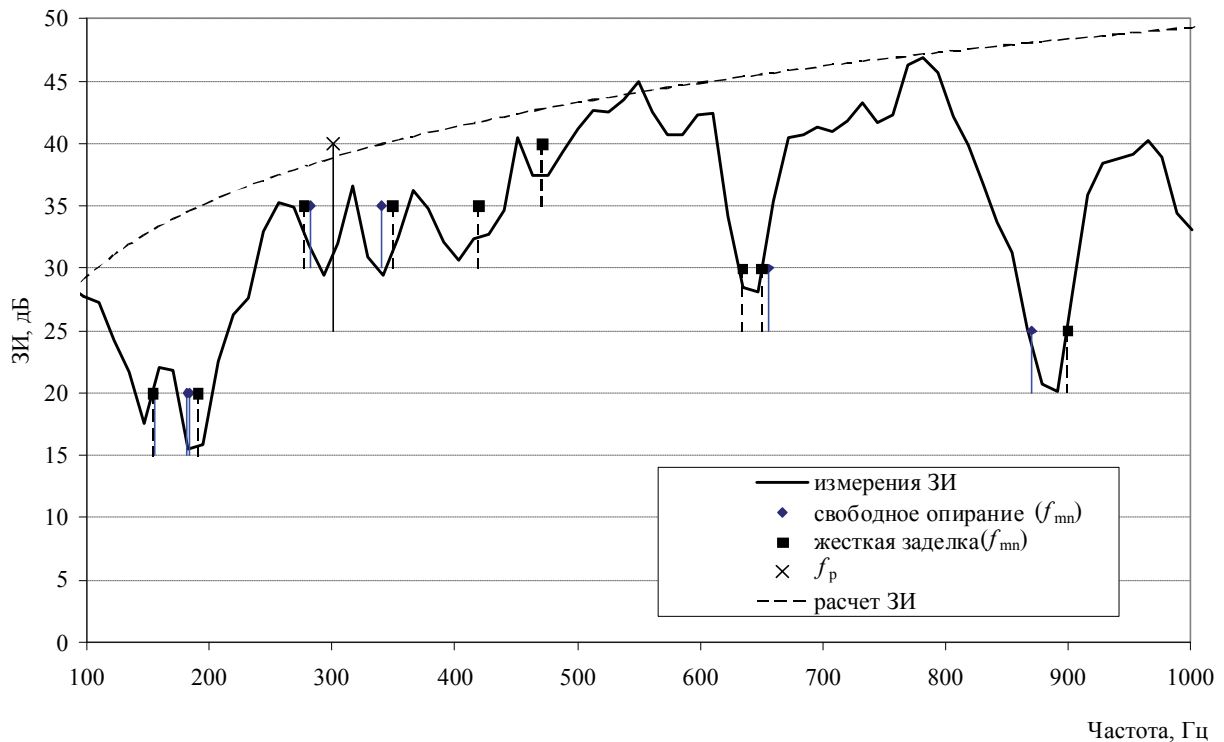


Рис. 5. Частотная ($\Delta f = 1,25$ Гц) характеристика звукоизоляции окна и расчетные значения резонансных частот колебаний стекол и одной из стеклопакетов

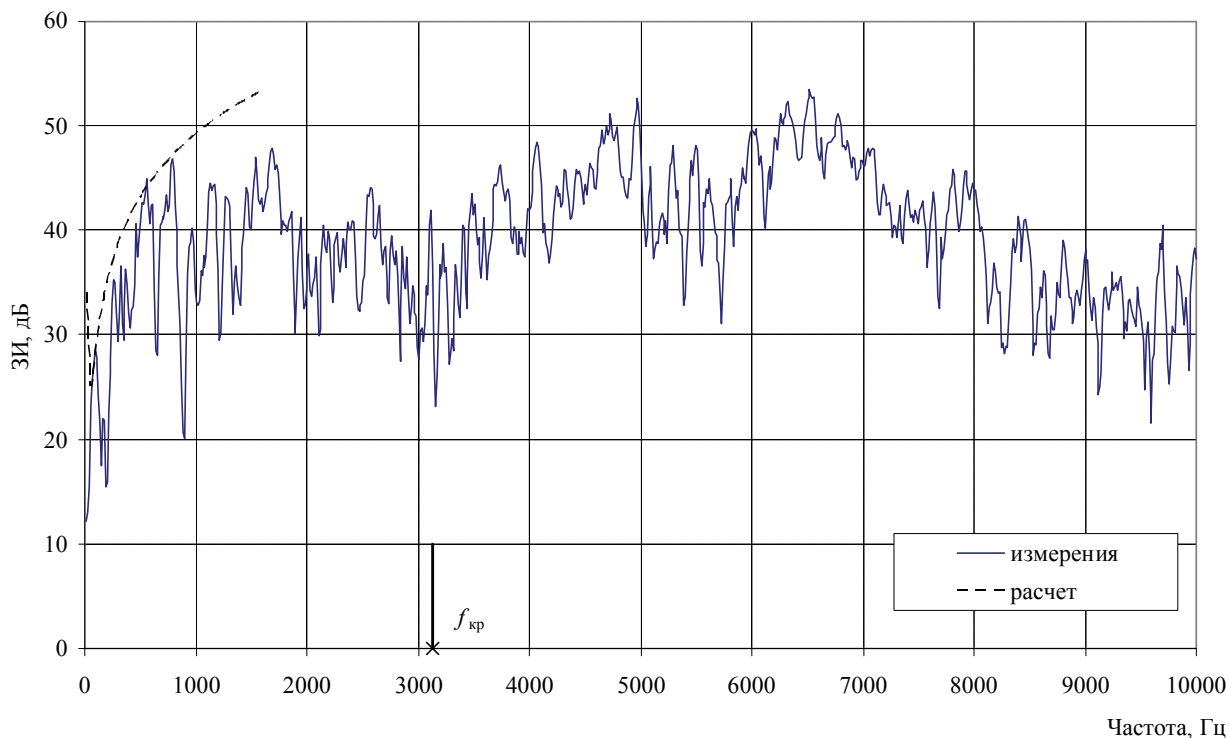


Рис. 6. Частотная ($\Delta f = 12,5$ Гц) характеристика звукоизоляции окна и расчетное значение критической частоты колебаний одной из стеклопакетов

Таблица 3. Результаты расчетов резонансных частот изгибных колебаний одного из стеклопакетов окна

Номера форм		Резонансные частоты f_{mn}		Частоты ЗИ _{min} (рис. 7)
m	n	Свободное опирание	Жесткая заделка	
1	1	55	68	–
2	1	83	102	–
3	1	125	154	147
1	2	155	191	183
2	2	182	225	–
4	1	184	226	–
3	2	225	277	–
5	1	258	317	293
4	2	283	349	293, 342
1	3	313	385	342
2	3	340	419	403
5	2	357	440	403
3	3	382	471	464
4	3	441	543	464, 476
5	3	515	634	573
1	4	528	650	647
2	4	555	684	647
3	4	598	736	–
4	4	656	808	–
5	4	730	899	891
1	5	800	986	891
2	5	828	1020	–
3	5	870	1072	–
4	5	929	1144	–
5	5	1003	1235	–

Стеклопакет 1 – 0,96 x 0,5 x 0,004 м ($\ell_1 \times \ell_2 \times h$), $d = 0,016$ м.

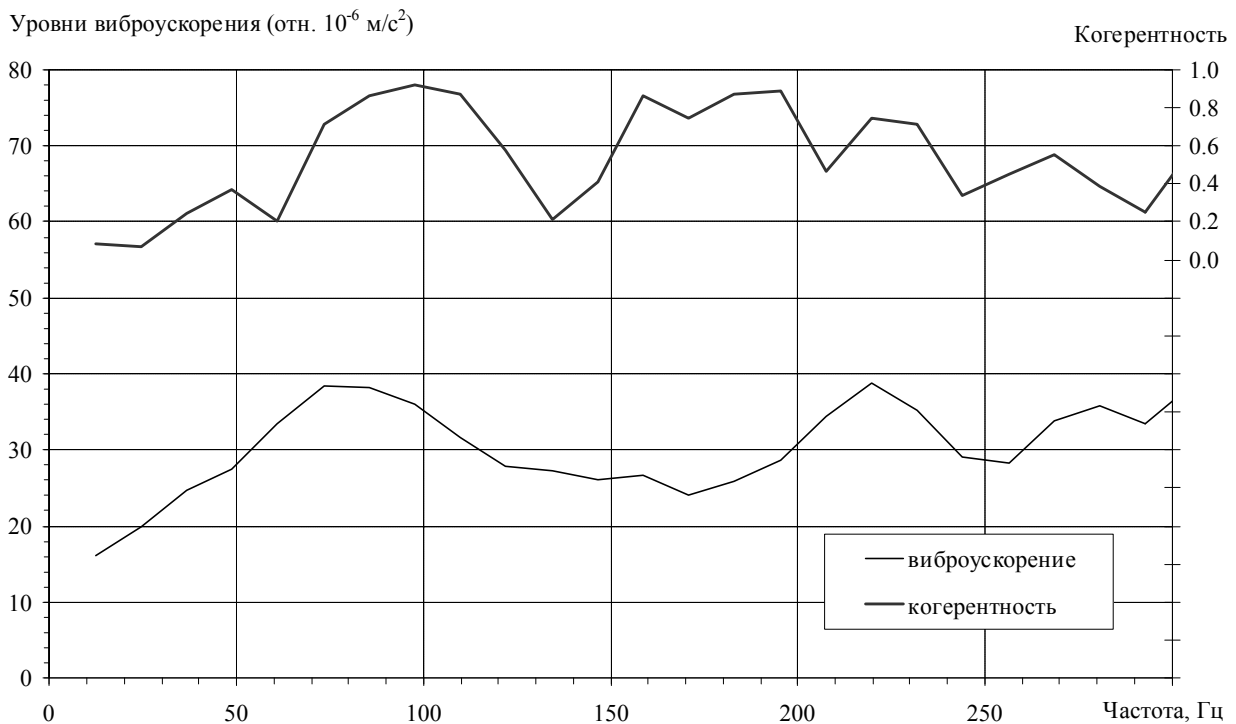


Рис. 7. Спектры виброускорения внутреннего стекла одной из стеклопакетов и когерентности виброускорения со звуковым давлением на улице

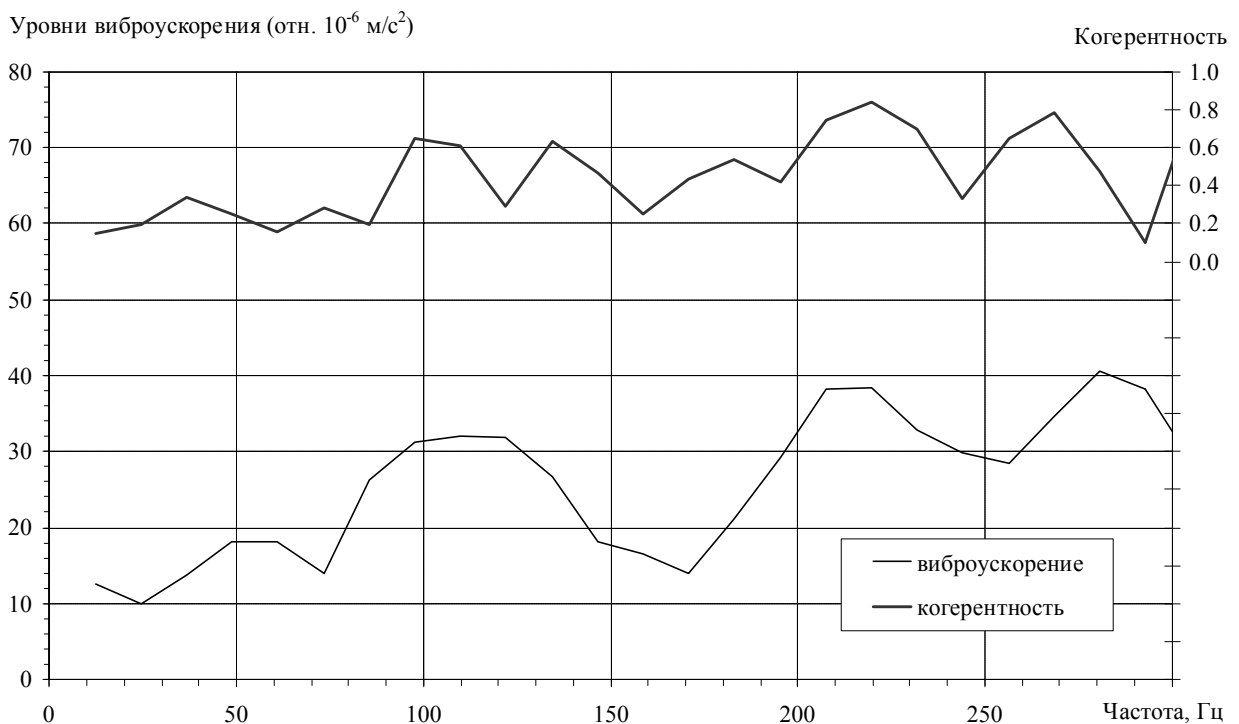


Рис. 8. Спектры виброускорения наружного стекла одной из стеклопакетов окна и когерентности виброускорения со звуковым давлением на улице

возрастает с увеличением частоты, что можно объяснить, в частности, изменением физической сути взаимодействия падающих звуковых волн со стеклами (изменение соотношения длин волны звука и изгибных колебаний в стеклах);

Полученные результаты свидетельствуют о значимом влиянии резонансных явлений в эле-

ментах остекления окон на прохождение через них шумового сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cremer L.* Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schragem Einfall // Akust. Zeitschrift, 1942, 7, p. 71-82.
2. Боголепов И.И. . Промышленная звукоизоляция.

- Судостроение, Ленинград, 1986.
3. *Климухин А.А.* Акустические характеристики светопрозрачных конструкций (окон). URL: <http://www.uatax.ru> (по материалам технического совещания в АПРОК 21 апреля 2001 г.) (дата обращения 22.12.2013).
4. Звукоизоляция и звукопоглощение. Учебное пособие для студентов вузов / *Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др.* [под ред. Г.Л. Осипова, В.Н. Бобылева], М.: ООО "Издательство АСТ", ООО "Издательство Аст-рель" 2004.
5. *Боголенов И.И., Столярова Н.П.* Три метода определения необходимой звукоизоляции окон: плюсы и минусы. С-Пб.: ГОУ С-Петербургский государственный политехнический университет.
6. *Васильев А.В.* Снижение низкочастотного звука и вибрации энергетических установок. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2006.
7. *Luzzi S., Vasilyev A.V.* Noise mapping and action planning in the Italian and Russian experience. 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 – Proceedings of the Institute of Acoustics 2009.

WHAT ARE THE REASONS FOR THE REDUCTION OF SOUND INSULATION OF WINDOWS

© 2014 V.Y. Kirpichnikov¹, L.F. Drozdova², D.V. Lyapunov¹, A.V. Kudaev²

¹Krylov Scientific Center – State Enterprise, St. Petersburg

²Baltic State Technical University "VOENMECH" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg

Article experimentally and theoretically investigated the influence of resonances flexural vibrations in glasses on the propagation of sound through the windows. The presence of peaks in the spectra of vibration of glasses confirmed the presence in glasses flexural resonances. Analysis of received calculation data showed that many of the calculated values of resonant frequencies of flexural vibrations of glass are in the frequency ranges minimal conditional insulation in windows. Studies have confirmed the significance of the influence of resonant phenomena in the elements of glass windows of the passage through the sound.

Keywords: structure noise, modeling, rail, wheel

Valery Kirpichnikov, Doctor of Technics, Professor, Chief Researcher. E-mail: sotnik26@bk.ru

Lyudmila Drozdova, Candidate of Technics, Professor. E-mail: drozdovalf@yandex.ru

Dmitry Lyapunov, Candidate of Technics, Senior Researcher. E-mail: norushka@rol.ru

Alexander Kudaev, Candidate of Technics, Associate Professor. E-mail: Ksiombarg1@yandex.ru