

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ЗВУКОВОМ И ПСЕВДОЗВУКОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© 2023 г. А. Я. Зверев*

ФАУ ЦАГИ, Московский комплекс, ул. Радио 17, Москва, 107005 Россия

*e-mail: zverev@dubna.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению акустических и виброакустических характеристик панели из полимерного композиционного материала в сравнении с характеристиками подкрепленной металлической панели сопоставимой массы и относительной жесткости. Сравнительный анализ характеристик проведен для панелей без облицовки и облицованных вибропоглощающим материалом в случае их возбуждения звуковыми и псевдозвуковыми полями пульсаций давления.

Ключевые слова: звукоизоляция, отражение, диссипация, композитная панель

DOI: 10.31857/S0320791923600051, EDN: IUDXDA

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы с каждым годом играют все более значимую роль при создании авиационной техники. При этом темпы изучения свойств новых материалов зачастую отстают от темпов их создания. В частности, в настоящее время мы не имеем достаточно данных об акустических и виброакустических характеристиках конструкций, выполненных из композиционных материалов. Поэтому существует настоятельная потребность в экспериментальном определении основных акустических и виброакустических характеристик конструкций из полимерных композиционных материалов и их сравнения с хорошо изученными характеристиками традиционных подкрепленных металлических самолетных конструкций. Знание этих характеристик позволит оптимизировать конструкцию из композиционного материала с учетом эффектов влияния пространственно-временной структуры звуковых и псевдозвуковых полей пульсаций давления на обтекаемой поверхности самолета.

Акустическое воздействие пульсаций на конструкцию самолета может быть смоделировано в реверберационных камерах при возбуждении тестовых панелей диффузным звуковым полем, так как при таком моделировании могут быть воспроизведены как частотные, так и волновые характеристики реального возбуждающего поля. Измеренные при таких испытаниях характери-

стики панелей могут быть непосредственно использованы, например, при прогнозе шума в салоне самолета под акустическим воздействием силовой установки. Эффекты увеличения звукоизоляции панелей за счет их облицовки вибропоглощающими материалами, измеренные в лабораторных условиях, также могут быть непосредственно использованы при прогнозе шума в самолете от этого источника.

Воздействие псевдозвуковых пульсаций давления, обусловленных влиянием турбулентного пограничного слоя или струи двигателя на конструкцию, не может быть смоделировано при ее акустическом нагружении. Это связано с принципиальным различием волнового состава звуковых и псевдозвуковых полей. Частотно-волновой спектр диффузного звукового поля в реверберационной камере ограничен волновыми числами $|k| \leq \omega/c_0$. Это означает, что в заданной полосе частот звуковое поле не может возбудить коротковолновые моды панели с волновыми числами, большими $k_0 = \omega/c_0$, которые хорошо возбуждаются псевдозвуковыми пульсациями давления и могут определять характеристики отражения и прохождения в условиях полета. Поэтому для моделирования поведения конструкции под действием псевдозвуковых пульсаций используется ее точечное механическое возбуждение, при котором в конструкции возбуждается весь спектр структурных мод аналогично тому, как это проис-

ходит при обтекании фюзеляжа турбулентным потоком. Полученные при данном возбуждении характеристики могут быть использованы для прогноза шума, излучаемого в салон самолета и во внешнее акустическое пространство. В частности, звуковая мощность, излучаемая панелью в камеру низкого уровня при ее точечном возбуждении вибростендом, определяется отношением коэффициента потерь на излучение к полному коэффициенту потерь. Этим же параметром определяется звуковая мощность, излучаемая бортовой самолетной конструкцией в салон под действием пульсаций давления турбулентного пограничного слоя. Этот факт позволяет оценить эффективность применяемых материалов в условиях полета по результатам определения виброакустических характеристик голых и облицованных панелей в лабораторных условиях.

Ранее [1] были представлены данные по звукоизоляции, полному коэффициенту потерь, коэффициенту потерь на излучение, акустической вибровозбудимости и др. для многослойных панелей различной толщины, изготовленных из композиционного материала на основе ткани из углеволокна. Была также приведена оценка эффективности нескольких вариантов вибропоглощающих покрытий при диффузном звуковом и точечном механическом возбуждении панелей [2]. В данной статье представлены результаты определения основных виброакустических характеристик композитной панели в сравнении с характеристиками подкрепленной металлической панели сопоставимой массы и относительной жесткости. Сравнительный анализ проведен для панелей без облицовки и облицованных вибропоглощающим материалом (ВПМ) в случае их возбуждения звуковыми и псевдозвуковыми полями пульсаций давления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ТЕСТОВЫЕ ПАНЕЛИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в данной статье, были проведены в реверберационных камерах стенда АК-11. Описание стенда представлено в [1]. В экспериментах были задействованы две плоские панели с примерно одинаковой поверхностной массой, выполненные из разных материалов. Первая панель состоит из девяти слоев композиционного материала, изготовленного на основе ткани из высокопрочного углеродного волокна. Суммарная толщина панели 5.0 мм, поверхностная масса 7.0 кг/м². Вторая — тонкостенная плоская панель, выполненная из алюминиевого сплава и подкрепленная перекрестным набором стрингеров и шпангоутов, моделирует типовую борто-

вую конструкцию самолета. Поверхностная масса панели 7.2 кг/м².

Испытания проводились как на необлицованных панелях, так и на панелях, облицованных вибропоглощающим материалом ВТП-1В толщиной 1.0 мм с поверхностной массой 1.1 кг/м². Облицовка композитной панели производилась по всей ее площади, так что поверхностная масса облицованной панели составила 8.1 кг/м². У металлической панели облицовывались только шпации, так что ее поверхностная масса с облицовкой составила 8.12 кг/м².

В результате испытаний была определена звукоизоляция голых и облицованных панелей, а также их виброакустические характеристики — полный коэффициент потерь, коэффициент потерь на излучение в камеры высокого (КВУ) и низкого (КНУ) уровня, акустическая вибровозбудимость. Метод определения акустических и виброакустических характеристик панелей, методика проведения испытаний и используемое при измерениях оборудование и программное обеспечение описаны в работе [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим последовательно и сравним между собой измеренные характеристики композитной и металлической панелей. На рисунках будем использовать букву “С” для обозначения композитной панели, букву “М” — для обозначения металлической панели. Индекс “0” означает необлицованную панель, индекс “1” — панель, облицованную ВПМ. Например, обозначение “С0” соответствует необлицованной композитной панели, а “М1” — облицованной металлической.

На рис. 1 приведены значения измеренной звукоизоляции композитной панели в диффузном звуковом поле в сравнении со звукоизоляцией металлической панели. Здесь сплошными линиями с маркерами приведены кривые звукоизоляции необлицованных панелей, а пунктирными линиями без маркеров — панелей с облицовкой. Красные линии соответствуют композитной панели, синие линии — металлической.

Из рисунка видно, что, начиная с полосы частот 400 Гц, звукоизоляция голой композитной панели превышает звукоизоляцию металлической панели. В отдельных полосах частот превышение достигает 10 дБ. Исключение составляют полосы частот 2000—3150 Гц, в которых звукоизоляция композитной панели несколько меньше звукоизоляции металлической панели. Это объясняется тем, что в полосу 2500 Гц попадает критическая частота композитной панели, что и приводит к провалу ее звукоизоляции. Критическая частота металлической панели с толщиной об-

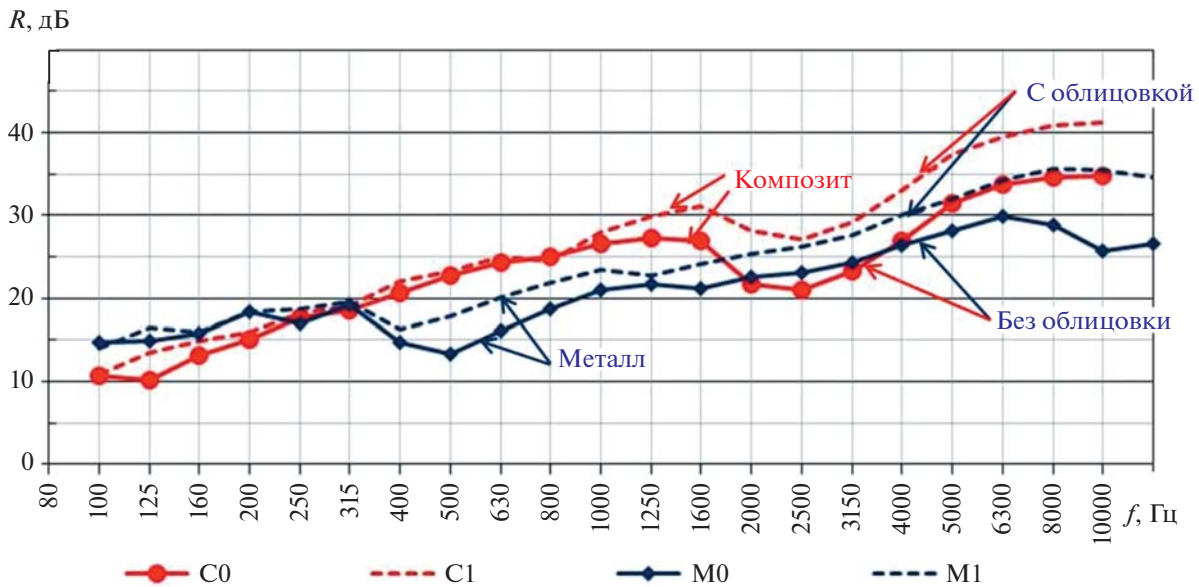


Рис. 1. Звукоизоляция композитной и металлической панели в диффузном поле.

шивки 1.2 мм лежит в полосе 10000 Гц, о чем свидетельствует провал ее звукоизоляции в этой частотной области.

Зная критическую частоту и массу композитной панели, можно рассчитать ее жесткость и оценить модуль Юнга материала. Для данной панели он равен $E = 3.8 \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$. При известной плотности материала, которая составляет $\rho = 1.4 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, можно оценить относительную жесткость панели E/ρ . Для данной панели $E/\rho = 2.7 \times 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$, что лишь на 4% выше аналогичной величины для панели из алюминиевого сплава. Таким образом, сравниваемые композитная и металлическая панели имеют не только одинаковую поверхностную массу, но и одинаковую относительную жесткость.

Облицовка панелей вибропоглощающим материалом приводит к увеличению звукоизоляции композитной панели на частотах выше 1000 Гц, металлической — на частотах выше 400 Гц. Как будет показано ниже, именно на этих частотах суммарная звукоизоляция панелей определяется резонансным механизмом прохождения звука. Облицовка панелей ВПМ приводит к тому, что звукоизоляция композитной панели становится выше звукоизоляции металлической панели на всех частотах выше 315 Гц, так как в окрестности критической частоты эффективность облицовки максимальная.

На рис. 2 приведены частотные зависимости полного коэффициента потерь для рассматриваемых вариантов панелей. Видно, что у необлицованной композитной панели полный коэффициент

потерь почти не изменяется с частотой и его значение равно примерно 0.01. У металлической панели полный коэффициент потерь изменяется от 0.002 на низких частотах до 0.06 в окрестности критической частоты. Почти во всем частотном диапазоне полный коэффициент потерь композитной панели выше, чем металлической.

Облицовка композитной панели вибропоглощающим материалом приводит к увеличению полного коэффициента потерь в 2–3 раза почти на всех частотах. У металлической панели на частотах ниже 500 Гц облицовка неэффективна, а эффективность ее применения на более высоких частотах заметно ниже, чем у композитной панели.

На рис. 3 приведены кривые значений коэффициента потерь на излучение в камеру низкого уровня. Этот коэффициент определяет долю энергии, излучаемой в рассматриваемое полупространство, относительно суммарной энергии колебаний панели.

Из рисунка видно, что коэффициент потерь на излучение в КНУ композитной панели выше этого коэффициента металлической панели практически во всем частотном диапазоне. Особенно сильно это выражено в низкочастотной части спектра, где коэффициент потерь на излучение композитной панели до 30 раз больше этой величины для металлической панели. Облицовка панелей ВПМ слабо влияет на коэффициент потерь на излучение в КНУ.

Акустическая вибровозбудимость, определяемая как отношение энергии колебаний панели E_2 к энергии звукового поля в камере высокого уровня E_1 , оценивается по результатам измерения

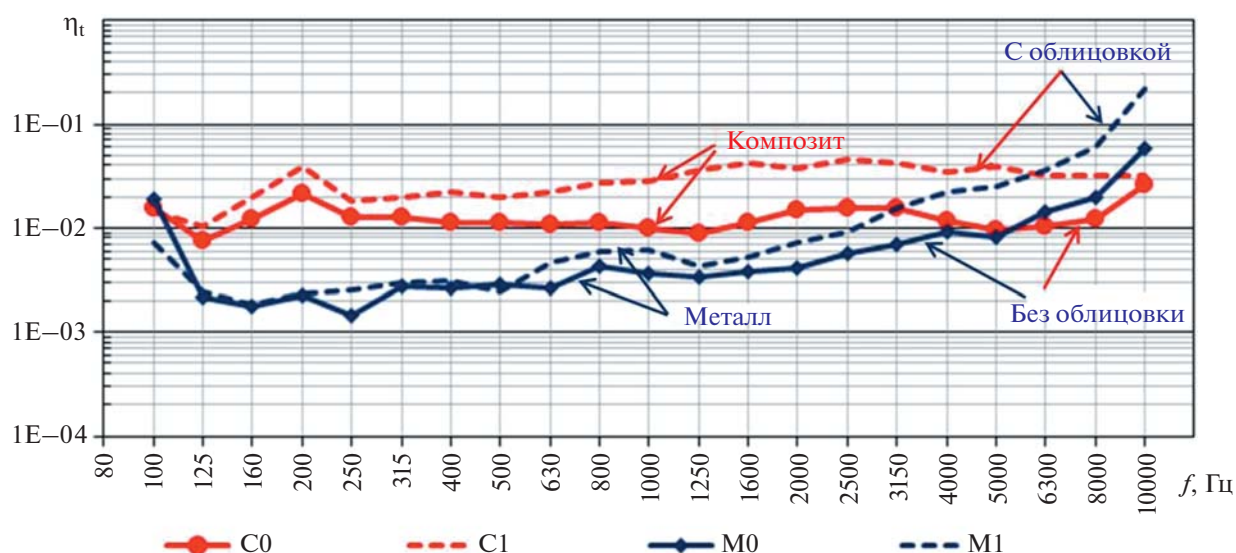


Рис. 2. Полный коэффициент потерь композитной и металлической панели.

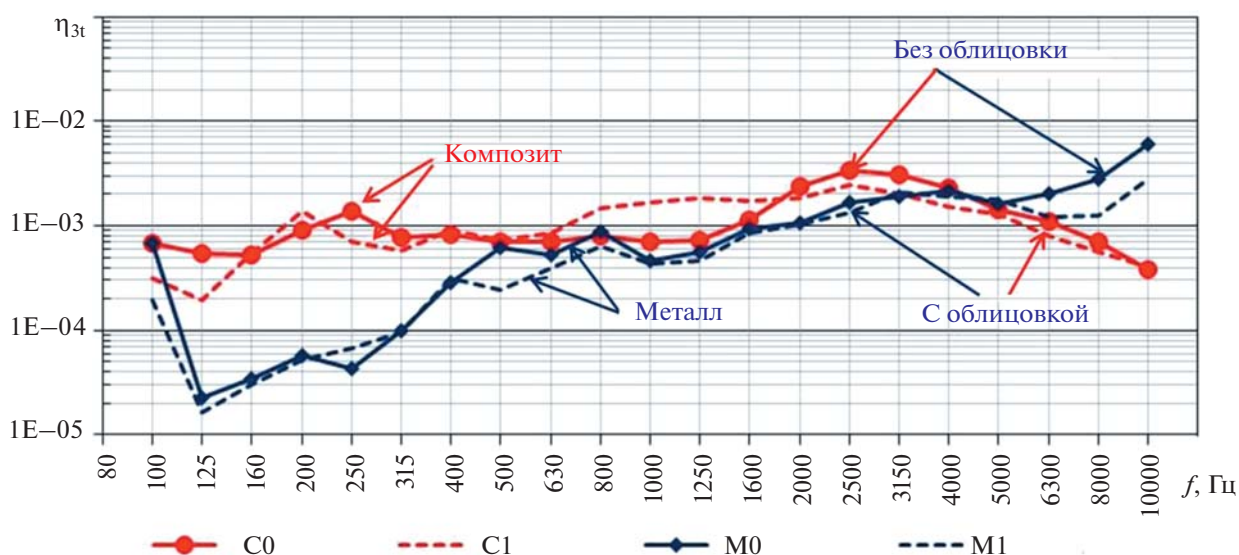


Рис. 3. Коэффициент потерь на излучение в КНУ композитной и металлической панели.

вибраций панели и уровней звукового давления в КВУ. На рис. 4 приведены результаты измерений этой характеристики для рассматриваемых панелей. Из рисунка видно, что вибровозбудимость необлицованной композитной панели значительно ниже вибровозбудимости металлической панели. На частотах 400–1600 Гц величина вибровозбудимости этих панелей отличается на порядок. Облицовка панелей вибропоглощающим материалом приводит к еще большему различию в их акустической вибровозбудимости. В указанном частотном диапазоне вибровозбудимость

композитной панели становится ниже в 20–60 раз по сравнению с металлической.

На основе измеренных характеристик может быть рассчитана резонансная составляющая звукоизоляции панелей при их акустическом возбуждении, а также получена оценка суммарной звукоизоляции и ее составляющих от пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в условиях полета.

Звукоизоляция R преграды определяется через ее коэффициент звукоизоляции r или через ко-

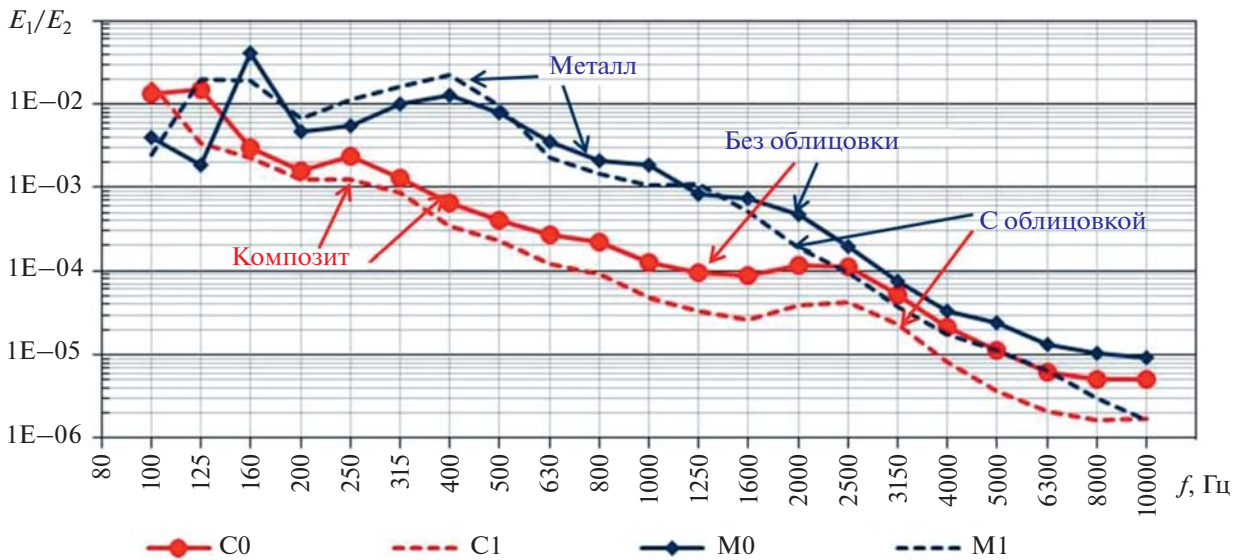


Рис. 4. Акустическая вибровозбудимость композитной и металлической панели.

эффицент прохождения (коэффициент звукопроницаемости) $\tau = 1/r$ как

$$R = 10 \lg r = 10 \lg 1/\tau.$$

Коэффициент прохождения τ связан с коэффициентом рассеяния (коэффициентом внутренних потерь) η_{in} и с коэффициентом отражения ε соотношением, выражающим закон сохранения энергии:

$$\eta_{in} + \tau + \varepsilon = 1.$$

Таким образом, определение суммарной звукоизоляции преграды и ее резонансной составляющей, а также потерь в ней на основе измеренных виброакустических характеристик для различного типа нагрузки идентично определению характеристик отражения и прохождения звуковых и псевдозвуковых пульсаций.

Выражение для коэффициента прохождения энергии через конструкцию за счет резонансного механизма звукопередачи τ_r в диффузном поле нагрузки можно получить из соотношений энергетического статистического метода:

$$\tau_r = \eta_{3r} \frac{E_2}{E_1} \frac{8\pi f_0 V_3}{c_0 A},$$

где V_3 – объем КВУ, A – площадь панели. Коэффициент τ_n за счет нерезонансного прохождения энергии не может быть измерен, но его можно рассчитать по закону масс для диффузного поля.

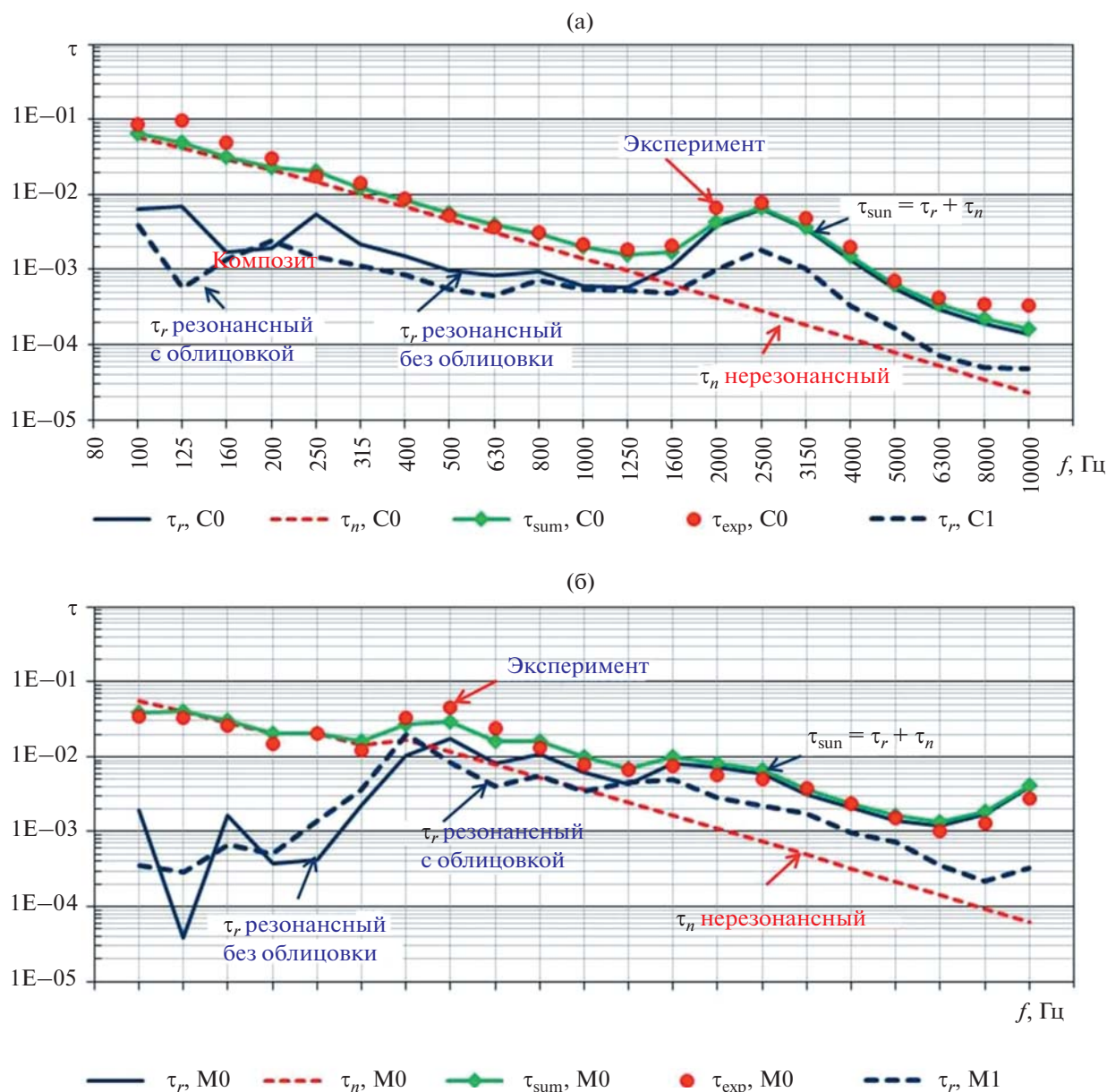
На рис. 5а для необлицованной композитной панели кривая резонансного коэффициента прохождения τ_r изображена сплошной синей линией. Красной прерывистой линией приведены

значения коэффициента нерезонансной передачи τ_n . Суммарный коэффициент прохождения $\tau_{sum} = \tau_r + \tau_n$ изображен сплошной зеленой линией с маркерами. Красными круглыми маркерами нанесены значения коэффициента прохождения τ_{exp} , полученного на основе измеренной звукоизоляции панели, приведенной на рис. 1.

Из рис. 5а следует, что суммарный коэффициент прохождения τ_{sum} , рассчитанный на основе закона массы и измеренных виброакустических характеристик, хорошо совпадает с экспериментально полученным коэффициентом τ_{exp} во всем частотном диапазоне. На частотах ниже 1600 Гц прохождение энергии обусловлено, в основном, нерезонансным механизмом звукопередачи при незначительном влиянии резонансного прохождения. На частотах 1600 Гц и выше прохождение энергии определяется исключительно резонансной звукопередачей.

Облицовка панели ВПМ приводит к ослаблению резонансной передачи. На рис. 5а резонансный коэффициент звукопередачи для облицованной панели показан пунктирной линией. Можно видеть, что облицовка приводит к существенному снижению резонансной передачи на всех частотах и, как следствие, к снижению суммарной передачи на частотах выше 1250 Гц, где резонансная передача превалирует.

Для металлической панели наблюдается отличное от композитной панели поведение коэффициентов прохождения. На рис. 5б приведены коэффициенты прохождения для необлицованной металлической панели. Из рисунка видно, что нерезонансная передача является определяю-



щей только на частотах ниже 400 Гц. В диапазоне частот 400–1250 Гц резонансный и нерезонансный коэффициенты звукопередачи сопоставимы по величине. На более высоких частотах определяющей становится резонансная передача.

Облицовка металлической панели вибропоглощающим материалом не так эффективна, как облицовка композитной панели. На рис. 5б пунктирной линией приведены значения резонансного коэффициента для облицованной панели. Можно видеть, что максимальная эффективность облицовки наблюдается в окрестности критической частоты 10000 Гц. На частотах 250–400 Гц облицовка даже повышает резонансный коэффи-

циент прохождения, хотя это и не приводит к уменьшению суммарной звукоизоляции.

На рис. 6а приведены частотные зависимости коэффициентов прохождения и рассеяния для композитной панели при ее акустическом возбуждении. Сплошной зеленой линией с маркерами приведены значения суммарного коэффициента прохождения для необлицованной панели. Сплошной синей линией изображена кривая значений коэффициента внутренних потерь необлицованной панели. Прерывистыми линиями приведены значения коэффициентов для облицованной панели. Из рисунка следует, что для панели без облицовки на частотах выше 400 Гц

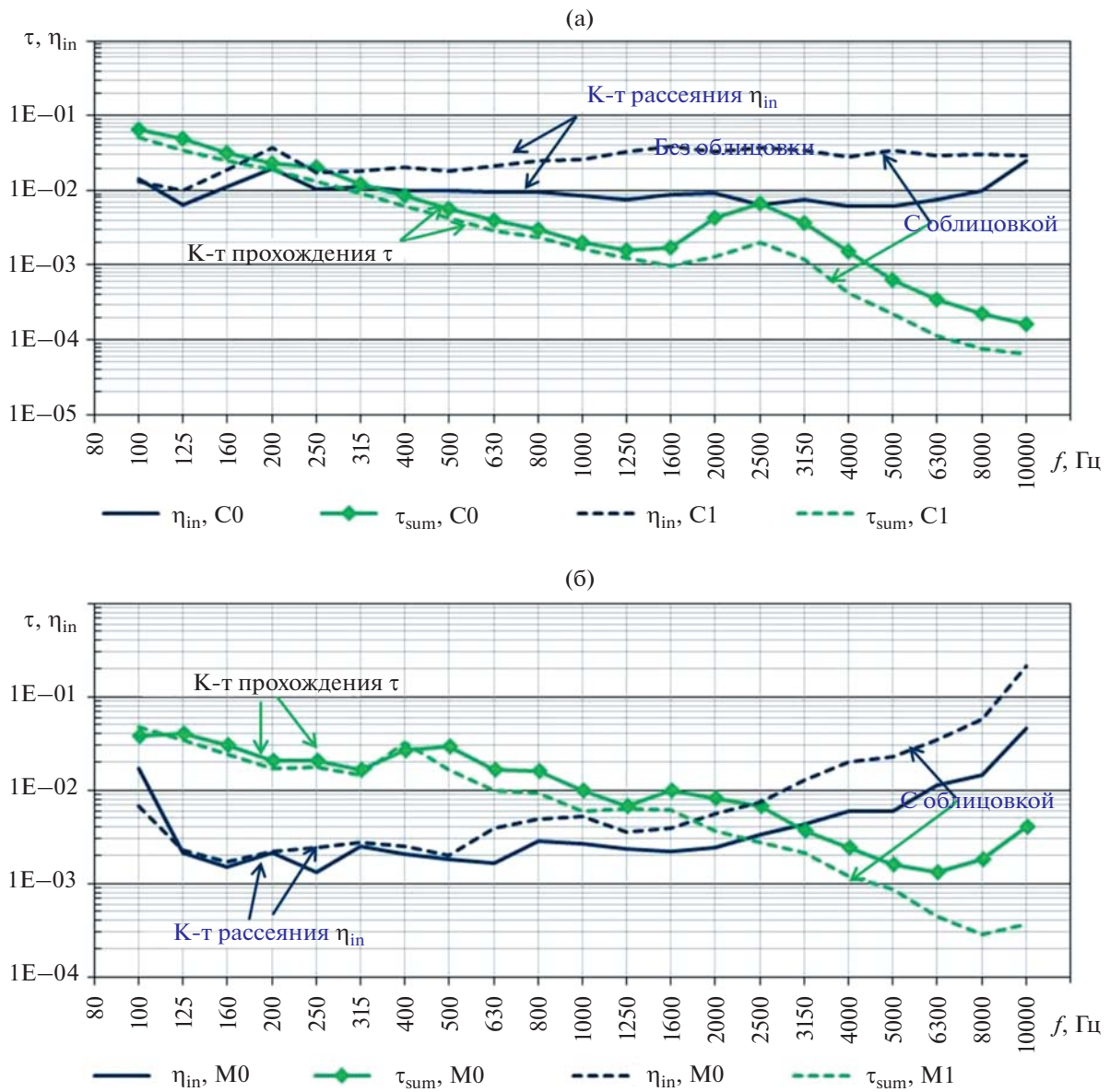


Рис. 6. Коэффициенты прохождения и рассеяния (а) – для композитной панели, (б) – для металлической панели.

коэффициент рассеяния значительно превышает коэффициент прохождения. Исключение составляет полоса частот 2500 Гц, в которой эти коэффициенты совпадают. В этой полосе находится критическая частота панели. Облицовка панели ВПМ приводит к увеличению коэффициента рассеяния и уменьшению коэффициента прохождения, как это показано прерывистыми линиями на рис. 6а.

Значения коэффициентов прохождения и рассеяния для металлической панели при ее акустическом возбуждении показаны на рис. 6б. Здесь для необлицованной панели коэффициент рассеяния превышает коэффициент прохождения

лишь на частотах выше 3150 Гц. Для облицованной панели эта частота равняется 1600 Гц, что в 10 раз превышает аналогичную частоту для композитной панели.

На рис. 7 приведены коэффициенты прохождения для композитной и металлической панелей при их звуковом возбуждении. Из этого рисунка видно, что композитная панель является более эффективной преградой на пути распространения звуковых волн в области частот выше 315 Гц.

На рис. 8 приведены значения коэффициентов отражения акустических пульсаций для всех испытанных вариантов панелей. Все значения лежат в диапазоне 0.92–0.99 за исключением полосы

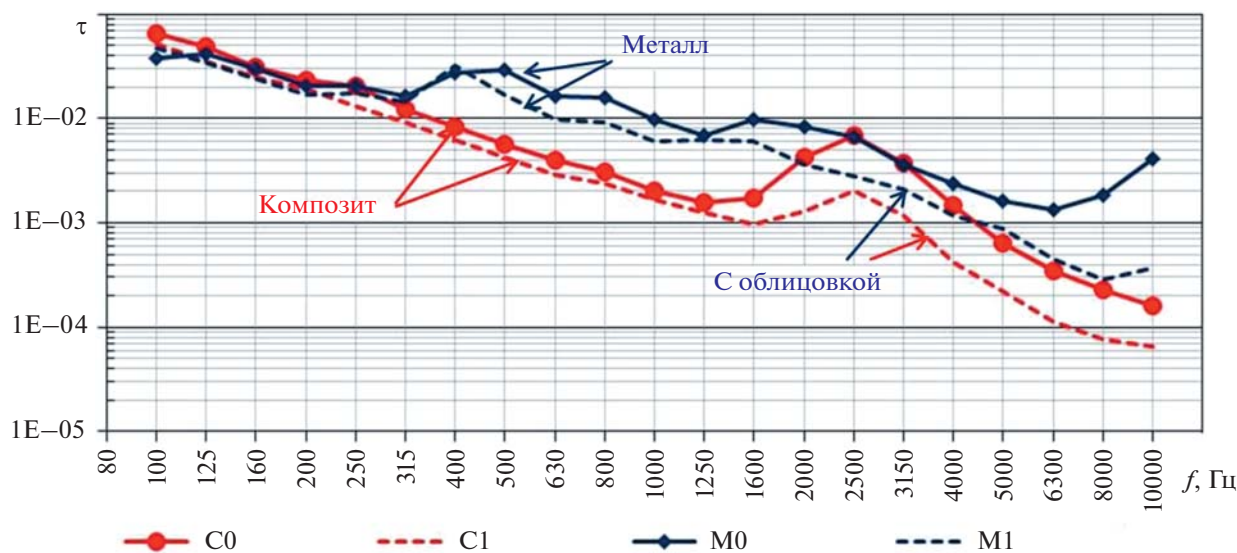


Рис. 7. Коэффициенты прохождения для композитной и металлической панели.

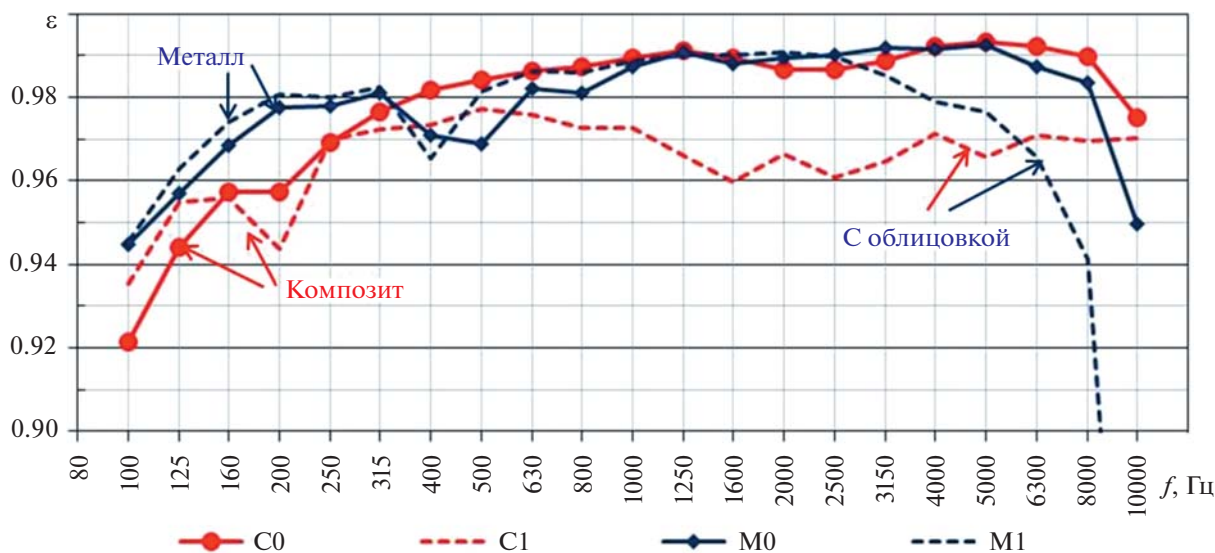


Рис. 8. Коэффициенты отражения для композитной и металлической панели.

10000 Гц, где величина коэффициента отражения облицованной металлической панели равняется 0.78. Этот эффект объясняется резким увеличением внутренних потерь в окрестности критической частоты.

Из рисунка видно, что в диапазоне частот 630–8000 Гц композитная и металлическая панели без облицовки отражают звуковую энергию почти одинаково, с коэффициентом отражения $\epsilon \approx 0.98–0.99$. На частотах ниже 400 Гц коэффициент отражения металлической панели выше на 1–2%, а в полосе 10000 – ниже на 2.5%.

Облицовка металлической панели ВПМ почти не изменяет ее отражающую способность на частотах ниже 3150 Гц и значительно уменьшает на более высоких частотах за счет увеличения внутренних потерь. Облицовка композитной панели оказывает гораздо более сильное влияние на отражающую способность, которая уменьшается почти во всем диапазоне частот до 3% за счет сильного увеличения диссипации, как это следует из рис. 8а. Для облицованной панели коэффициент отражения на частотах выше 200 Гц лежит в диапазоне 0.96–0.98.

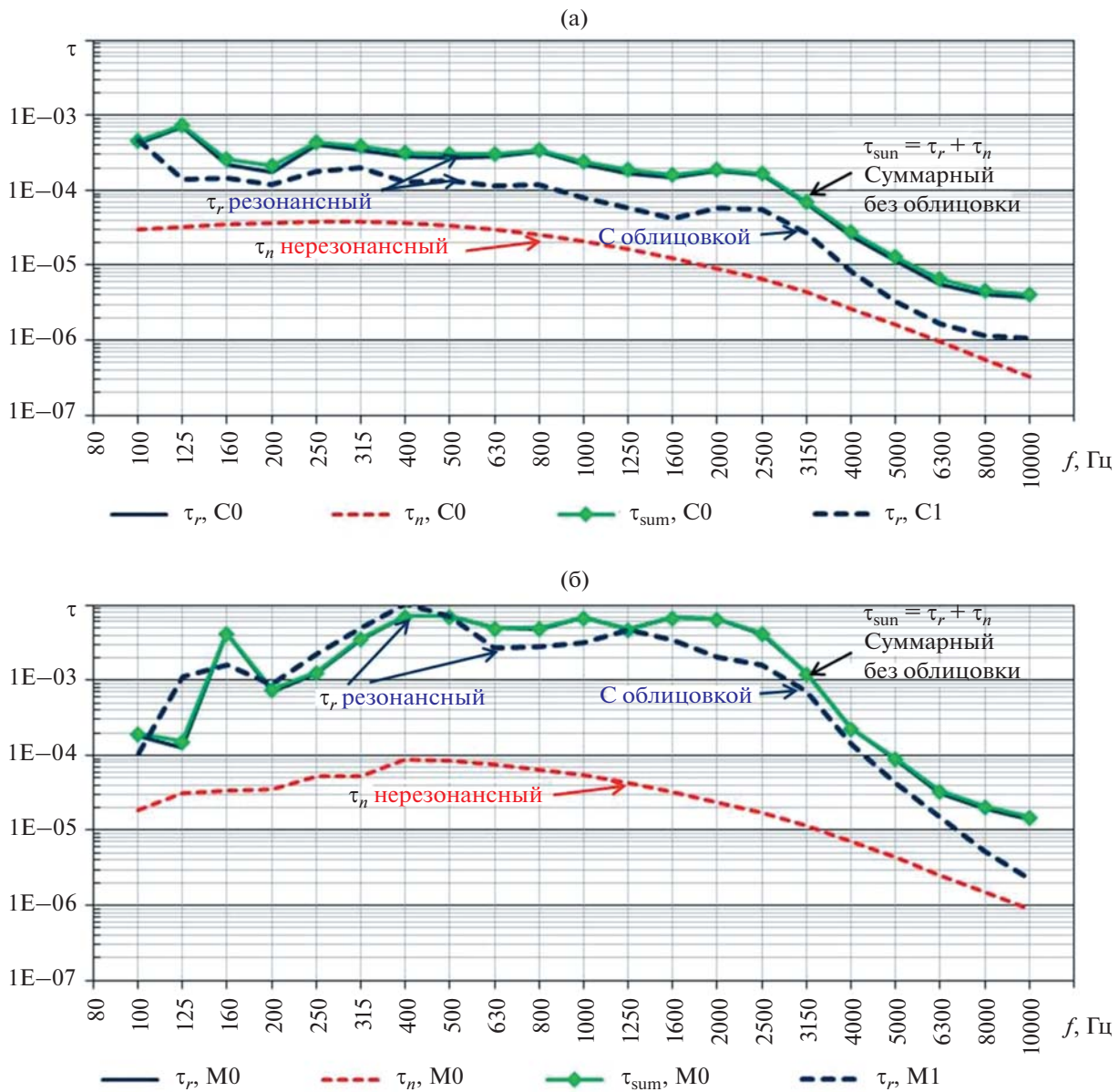


Рис. 9. Коэффициенты прохождения (а) – для композитной панели в потоке и (б) – для металлической панели в потоке.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАНЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ПОЛЕТА

В случае, когда конструкция подвержена воздействию псевдозвуковых пульсаций турбулентного потока, характеристики отражения и прохождения энергии изменяются. Коэффициенты прохождения при обтекании поверхности турбулентным потоком в условиях полета могут быть рассчитаны по известным соотношениям [3], в которые входят измеренные виброакустические характеристики панели и параметры потока.

На рис. 9а приведены значения резонансного, нерезонансного и суммарного коэффициентов

прохождения для необлицованной композитной панели. Здесь и ниже все коэффициенты получены для условий полета самолета на высоте $H = 10000$ м с числом Маха $M = 0.8$ и расстояния от носа самолета $x = 10$ м. Из рисунка видно, что в условиях полета суммарный коэффициент прохождения определяется исключительно резонансной передачей энергии в отличие от случая акустического возбуждения, когда большую роль играет нерезонансная звукопередача.

Облицовка панели ВПМ существенно понижает коэффициент прохождения, как это показано на рис. 9а пунктирной линией. Однако даже у облицованной панели определяющим является

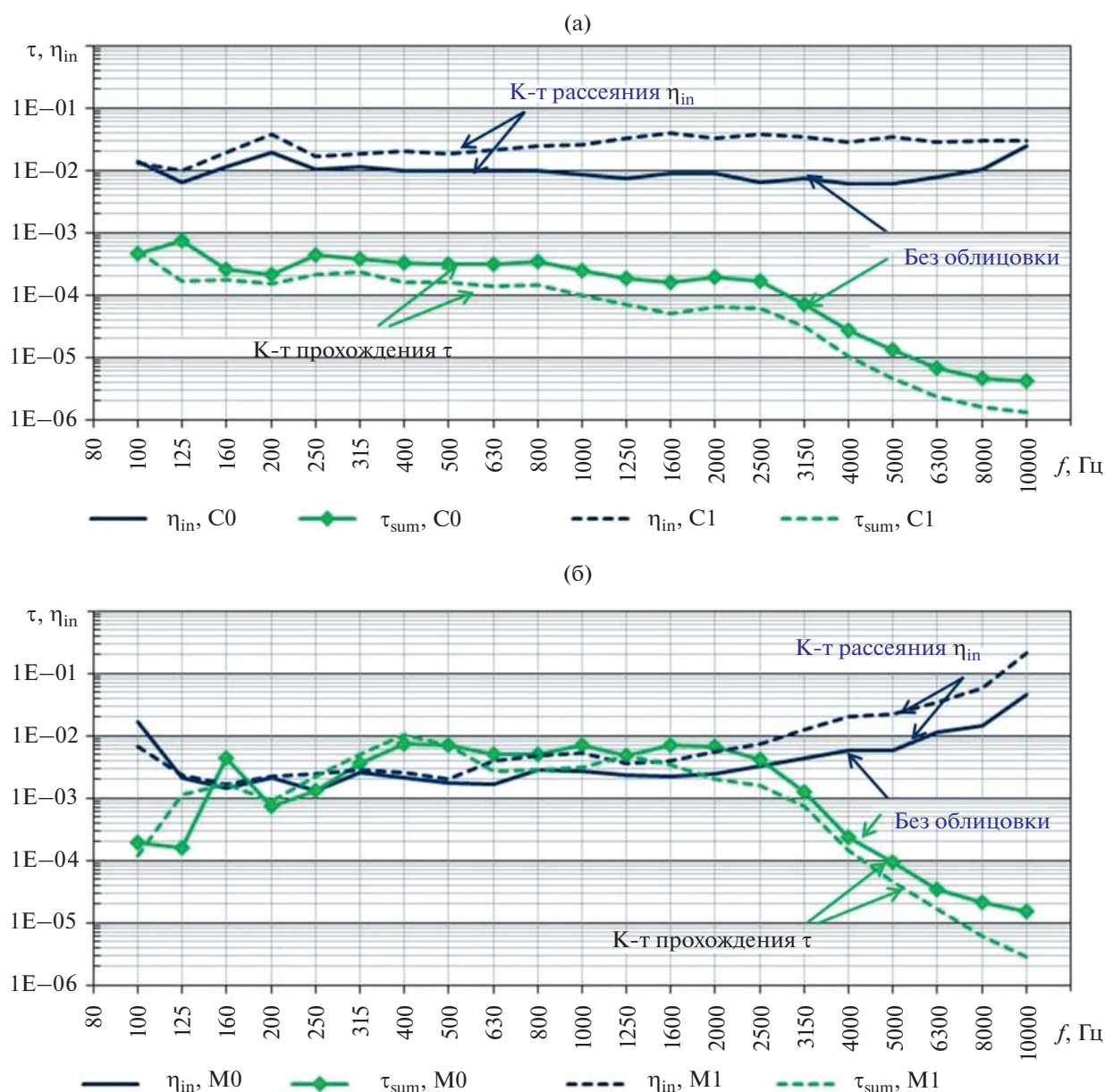


Рис. 10. Коэффициенты прохождения и рассеяния (а) – для композитной панели в потоке и (б) – для металлической панели в потоке.

резонансное прохождение энергии, как это и следует из рисунка. Влияние нерезонансной передачи слабо проявляется лишь в области высоких частот выше 4000 Гц.

Для металлической панели в условиях ее возбуждения псевдозвуковыми пульсациями давления определяющей также является резонансная передача. На рис. 9б приведены частотные зависимости для резонансного, нерезонансного и суммарного коэффициентов прохождения необлицованной металлической панели. Из рисунка видно, что суммарный коэффициент прохождения совпадает с резонансным во всем частотном

диапазоне. Значения нерезонансного коэффициента на один-два порядка ниже.

Облицовка металлической панели ВПМ несколько уменьшает резонансную передачу, однако она остается определяющей во всем частотном диапазоне. Значения коэффициента для облицованной металлической панели показаны на рис. 9б пунктирной линией.

На рис. 10а для композитной панели приведено сравнение коэффициентов прохождения и рассеяния при псевдозвуковом возбуждении. Можно видеть, что для голой панели коэффициент рассеяния более чем на порядок превышает коэф-

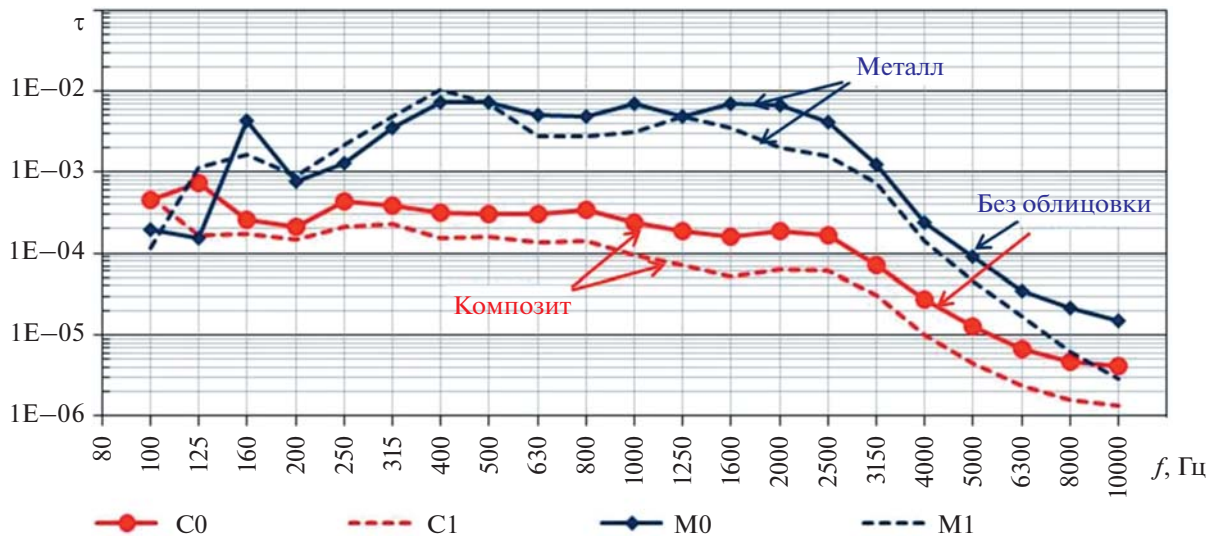


Рис. 11. Коэффициенты прохождения для композитной панели в потоке.

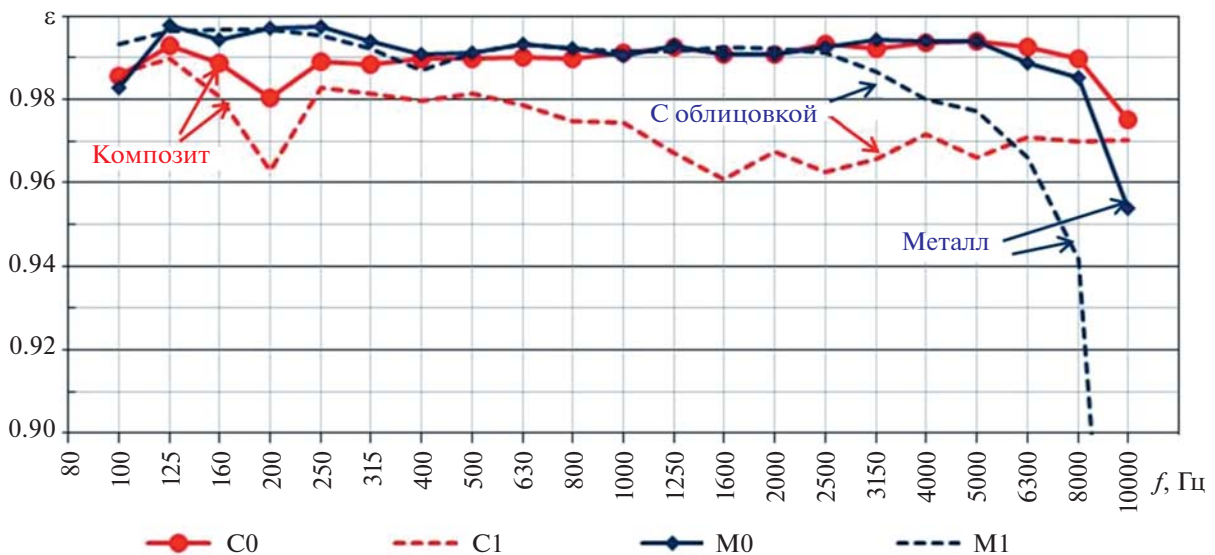


Рис. 12. Коэффициенты отражения для металлической панели в потоке.

коэффициент прохождения на всех частотах. Облицовка панели вибропоглощающим материалом увеличивает это различие до двух порядков и более.

Для металлической панели, возбуждаемой псевдозвуковыми пульсациями давления, коэффициенты прохождения и рассеяния сравнимы по величине на значительном протяжении частотной оси. На рис. 10б приведено сравнение этих коэффициентов для голой и облицованной металлической панели. На частотах выше 2500 Гц коэффициент прохождения уменьшается с частотой, а коэффициент рассеяния повышается и в полосе частот 10000 Гц различие между этими коэффициентами достигает от трех до пяти поряд-

ков для голой и облицованной панели соответственно.

На рис. 11 приведены суммарные коэффициенты прохождения для рассмотренных вариантов панелей при их возбуждении псевдозвуковыми пульсациями. Из рисунка видно, что в условиях полета коэффициент прохождения композитной панели примерно на порядок меньше коэффициента металлической панели. Облицовка конструкции ВПМ приводит к снижению коэффициента, но общая картина остается прежней — энергия псевдозвуковых пульсаций проникает через композитную панель примерно на порядок слабее, чем через металлическую.

На рис. 12 приведены значения коэффициента отражения для всех вариантов панелей в потоке. Для голой композитной панели коэффициент отражения почти постоянен во всем частотном диапазоне и равняется 0.99. Только в полосе 10000 Гц он уменьшается до величины 0.975. Облицовка композитной панели приводит к уменьшению коэффициента отражения до величины 0.96–0.98 за счет того, что значительная часть энергии поглощается.

Для голой металлической панели коэффициент отражения превышает значение 0.99 почти во всем диапазоне частот, а на низких частотах достигает величины 0.997. Уменьшение этого коэффициента наблюдается только в окрестности критической частоты, где его величина снижается до 0.95. Облицовка металлической панели практически не изменяет величину коэффициента отражения на частотах ниже 3150 Гц. На более высоких частотах его величина уменьшается с частотой и достигает величины 0.78 в полосе 10000 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты анализа данных, полученных при проведении экспериментальных исследований в реверберационных камерах. Определены виброакустические характеристики композитной и подкрепленной металлической панелей, обладающих одинаковой поверхностной массой и относительной жесткостью. Проведено сравнение виброакустических характеристик композитной панели с характеристиками металлической панели.

Определены коэффициенты прохождения, отражения и рассеяния для композитной и металлической панели без облицовки и с облицовкой для случая их звукового возбуждения и возбуждения псевдозвуковыми пульсациями давления турбулентного пограничного слоя в условиях, со-

ответствующих крейсерскому полету самолета. Проведено сравнение коэффициентов композитной и металлической панели.

Показано, что при звуковом и особенно при псевдозвуковом возбуждении звукопроницаемость композитной панели, характеризуемая коэффициентом прохождения, значительно ниже звукопроницаемости металлической панели. Этот вывод справедлив как для панели без облицовки, так и с облицовкой.

Установлено, что отражающая способность композитной и металлической панели без облицовки примерно одинакова. При наличии облицовки отражающая способность композитной панели ниже почти на всех частотах за исключением окрестности критической частоты металлической панели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-71-30016). Калибровка датчиков и измерительной системы проводилась на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-1036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев А.Я., Черных В.В.* Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 6. С. 727–736.
2. *Zverev A., Chernyh V.* Experimental investigation of acoustic and vibroacoustic characteristics of composite panels / Proc. the 24th ICSV, London, 23–27 July. 2017.
3. *Ефимцов Б.М., Зверев А.Я.* Колебания и акустическое излучение тонкостенных конструкций при неоднородном аэроакустическом возбуждении // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. 40. № 3. С. 60–69.