

УДК 534.2

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ САМОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© 2022 г. А. Я. Зверев<sup>1,\*</sup>, В. В. Черных<sup>1</sup>

Поступило 25.04.2022 г.  
После доработки 12.05.2022 г.  
Принято к публикации 12.05.2022 г.

В реверберационных камерах и на натурном стенде проведены испытания по определению вибрационных характеристик типовой фюзеляжной панели регионального самолета, а также конструкций борта, закрылка и крыла реального самолета с различным вибродемпфирующим набором. В условиях акустического возбуждения модельной панели и реальных самолетных конструкций определена эффективность следующих средств снижения вибраций: изменение граничных условий и жесткости шпангоутов; облицовка конструкции односторонними вибродемпфирующими сэндвичами и листовыми вибропоглощающими материалами ВТП-1В, СКЛГ-6020М; применение имитаторов стрингеров и шпангоутов, в том числе в комплекте с двусторонними вибродемпфирующими сэндвичами. Показано, что, применяя комбинацию различных методов, можно добиться существенного снижения вибраций конструкции в широком диапазоне частот. На низких частотах эффективным средством является преобразование длинноволновых форм колебаний шпангоута в более коротковолновые. В области средних частот эффективно снижают вибрации конструкции односторонние сэндвичи, а также имитаторы стрингеров совместно с двусторонними сэндвичами. В области высоких частот наиболее эффективна облицовка конструкции листовыми вибропоглощающими покрытиями.

*Ключевые слова:* вибропоглощение, фюзеляжная конструкция

**DOI:** 10.31857/S2686740022050157

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема снижения шума в салоне самолета по-прежнему остается актуальной для авиационной акустики. Ее решение требует применения целого ряда разнообразных мер и не приходится рассчитывать, что какая-либо одна мера может решить эту задачу радикально. Можно выделить шесть основных методов, применение которых в совокупности позволяет успешно решить проблему: снижение шума в источнике, звукоизоляция, звукопоглощение, виброизоляция, вибропоглощение, настройка конструкции. При этом задача осложняется тем, что невозможно найти решение, которое подходило бы для самолета любого класса. Каждая машина представляет собой систему с характерными особенностями: различаются между собой обшивки, схемы подкрепле-

ния силовыми элементами, типы внешних и внутренних источников шума и вибраций, зоны их расположения. Это, в свою очередь, ведет к различию виброакустических характеристик конструкций и механизмов их возбуждения и излучения. Поэтому обоснованный выбор мероприятий по уменьшению шума в салоне может быть сделан только после проведения измерений и анализа причин, вызывающих повышенные уровни шума, или после акустического расчета самолета и его исследования в процессе создания. При проведении измерений следует стремиться к тому, чтобы условия возбуждения и распространения упругих колебаний в конструкции максимально совпадали с натурными, так как отличия в граничных условиях, в механизме распространения колебаний, а также обусловленного этими колебаниями излучения звука могут привести к большим погрешностям при оценке эффективности тех или иных мероприятий. Поэтому для более полной и всесторонней оценки эффективности различных мероприятий по снижению шума в салоне результаты, полученные при проведении исследований в лабораторных условиях, желатель-

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, Москва, Россия

\*E-mail: zverev@dubna.ru

но верифицировать результатами испытаний, проведенных непосредственно на самолете.

В данной работе рассмотрены два из вышеперечисленных методов контроля шума в салоне самолета — вибропоглощение и настройка конструкции. Оба метода направлены на ослабление вибраций конструкции и, как следствие, на снижение излучаемого в салон шума. Для определения эффективности рассматриваемых методов проведены виброакустические испытания в лабораторных условиях на натурной панели фюзеляжа регионального самолета с различными вибропоглощающими материалами и конструкциями при ее нагружении диффузным звуковым полем, имитирующим воздействие реактивной струи двигателя. Для верификации полученных результатов также проведены испытания с аналогичными материалами на натурном стенде в различных зонах бортовой конструкции фюзеляжа самолета, крыла и элементов его механизации.

С панелями, моделирующими бортовую конструкцию различных самолетов, ранее уже проводилось большое количество испытаний в реверберационных камерах [1, 2]. Более того, в отдельных работах лабораторные исследования дополнялись и верифицировались испытаниями, проведенными в натуральных условиях [3, 4]. Проведение дополнительных испытаний потребовалось в основном по двум причинам.

Во-первых, практически все предыдущие испытания проводились с целью снижения шума в салоне самолета. Поэтому основной задачей, которая решалась при проведении таких испытаний, была задача определения звукоизолирующей способности бортовой самолетной конструкции и нахождение методов и средств ее повышения. Все остальные задачи, в том числе определение вибрационных характеристик конструкции при различных видах ее облицовки, были вторичны и решались постольку, поскольку были связаны с решением основной задачи определения звукоизоляции. В отличие от предыдущих, целью настоящей работы являются определение вибраций конструкции и нахождение решений для их снижения. Несмотря на то что понятия “шум” и “вибрация” тесно связаны друг с другом, для решения чисто вибрационных задач требуется проведение отдельных испытаний, отличных от тех, что проводились при решении задачи снижения шума в салоне.

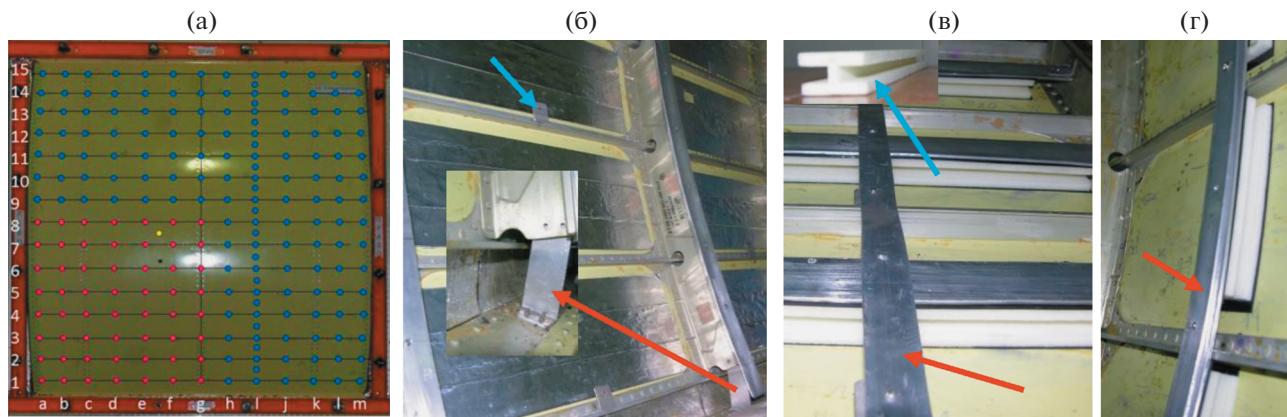
Во-вторых, все ранее проведенные испытания, в которых определялись вибрационные характеристики конструкции, были ограничены исследованием листовых вибропоглощающих покрытий. Особенностью таких покрытий является их высокая эффективность в области высоких частот. В области средних частот их эффективность снижается, а на низких частотах обли-

цовка конструкции таким покрытием зачастую приводит к повышению вибраций. При этом основные проблемы с вибрациями конструкций самолетов, как правило, ожидаются в области средних частот, в области максимальных нагрузок от реактивной струи двигателя. Поэтому в данной работе основное внимание уделено исследованию вибродемпфирующих конструкций, наиболее эффективных в области низких и средних частот. В области низких частот это конструкции, изменяющие упругие свойства силового набора за счет изменения граничных условий и жесткости шпангоутов. В области средних частот высокую эффективность показали конструкции с применением балочных демпферов. Суть балочных демпферов состоит в том, что на слой вибродемпфирующего материала наклеивается жесткий линейный стержень малой массы. Увеличение эффективности демпфирования происходит вследствие того, что деформации слоя по его толщине в этом случае существенно увеличиваются по сравнению со сдвиговыми деформациями, что приводит к значительному увеличению потерь энергии в слое [5, 6]. Такие конструкции с балочными демпферами были экспериментально исследованы в данной работе впервые, причем как в одностороннем варианте, так и в двустороннем варианте совместно с имитаторами шпангоутов и стрингеров.

## МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальные исследования по определению влияния различных вибропоглощающих материалов и средств изменения жесткости на вибрационные характеристики самолетных конструкций проводились в реверберационных камерах установки АК-11 и на стенде АС-14 ЦАГИ, подробное описание которых представлено в [3].

Лабораторные испытания. Реверберационные камеры объемом 210 и 220 м<sup>3</sup> соединены проемом 1.5 × 1.5 м, в который устанавливается испытываемая панель. Исследования проводились на потолочной цилиндрической панели радиусом 1.73 м, моделирующей бортовую конструкцию регионального самолета. Панель подкреплена шестью стрингерами с шагом 210 мм и тремя шпангоутами с шагом 500 мм, толщина обшивки 1.4 мм. Возбуждение панели производилось со стороны камеры высокого уровня двумя звуковыми колонками в широкой полосе частот белым шумом. Уровни звукового давления в камерах контролировались двумя микрофонами — по одному в каждой камере. Измерения вибраций проводились одновременно восемью датчиками, расположенными с лицевой стороны панели. Один из датчиков был опорным — его местоположение не изменялось при проведении измерений. Семь датчиков были подвижные — устанавлива-



**Рис. 1.** Расположение точек измерения на панели (а); панель с облицованными шпациями и закрепленными концами шпангоутов увеличенной жесткости (б), имитаторы стрингеров с сэндвичами (в), имитаторы шпангоутов с сэндвичами (г).

лись в центр шпации либо вдоль стрингера и последовательно перемещались снизу вверх панели. Общая схема расположения точек измерения показана на рис. 1а. Здесь желтым цветом показано местоположение опорного датчика. Красным цветом показаны точки определения вибраций при всех исследованных вариантах облицовки панели. Общее количество таких точек  $7 \times 8 = 56$ . Так как при акустическом возбуждении поле колебаний панели достаточно однородно, этих точек вполне достаточно для достоверного определения среднего уровня вибраций панели. При некоторых вариантах облицовки панели были определены собственные частоты и формы ее колебаний. В этом случае использовалась расширенная сетка точек измерения. Измерения вибраций проводились по всей поверхности панели — по всей совокупности красных и синих точек, показанных на рис. 1а. Общее число этих точек 209.

Перед проведением испытаний панель была доработана для того, чтобы стало возможным изменять жесткостные характеристики ее силового набора. С этой целью на раму панели были установлены дюралевые уголки для прикрепления шпангоутов к раме (показан красной стрелкой на рис. 1б). Также для возможности изменения жесткости силового набора и установки дополнительных силовых элементов — имитаторов шпангоутов, на стрингеры были установлены дюралевые уголки, как это показано на рис. 1б голубой стрелкой. На эти уголки в качестве имитаторов шпангоутов в некоторых вариантах устанавливались дюралевые полосы толщиной 3 мм, шириной 25 и 38 мм, отмеченные на рис. 1в красной стрелкой. Эти же полосы использовались в некоторых вариантах для увеличения жесткости шпангоутов. Они посредством винтовых соединений крепились к верхней полке шпангоутов.

Кроме исследований влияния жесткостных характеристик на вибрационное поведение панели, изучено влияние материала СКЛГ-6020М. Определена эффективность частичной и полной облицовки шпаций панели этим материалом. При частичной облицовке в шпации наклеивалась одна полоска СКЛГ шириной 60 мм. При полной облицовке — три таких полоски, как это показано на рис. 1б. Поверхностная масса материала СКЛГ-6020М составляет  $m = 1.25 \text{ кг/м}^2$ .

Большое внимание в данной работе уделено исследованиям по оценке влияния на колебания панели сложных составных вибропоглощающих конструкций, не исследованных ранее. Основной составной частью таких конструкций являются легкие жесткие I-образные балочные демпферы на основе полимерного пеноматериала (показан голубой стрелкой на рис. 1в). Ширина верхнего и нижнего оснований профиля равняется 40 мм, высота — 25 мм. Погонная масса демпфера  $m = 0.044 \text{ кг/м}$ . Было исследовано несколько вариантов с применением таких демпферов. В первом случае демпфер наклеивался в шпациях панели поверх полосок вибропоглощающего материала ВТП-1В толщиной 1.5 мм. Поверхностная масса материала ВТП-1В составляет  $m = 1.7 \text{ кг/м}^2$ . Во втором случае поверх демпфера накладывалась еще одна полоска ВТП-1В и этот трехслойный сэндвич сверху плотно с прижатием покрывался дюралевой полосой, концы которой крепились к шпангоутам. Такую конструкцию можно трактовать как имитатор стрингера с двусторонним демпфирующим сэндвичем. Для более плотного прижатия вибропоглощающего материала к средней части I-демпфера была установлена узкая дюралевая полоса параллельно шпангоутам. В результате вся эта конструкция выглядела так, как показано на рис. 1в. Еще один вариант представлял собой имитатор шпангоута с демпфирующим

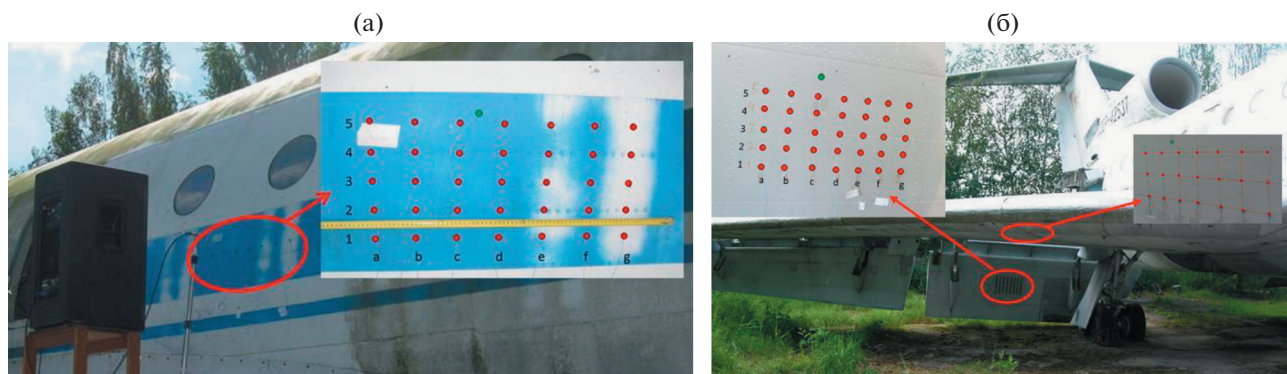


Рис. 2. Зоны измерений на фюзеляже самолета (а), на закрылке и на крыле (б).

сэндвичем. В этом случае демпфирующий трехслойный сэндвич располагался между обшивкой и имитатором шпангоута, как это показано на рис. 1г. Здесь имитатор шпангоута состоял из полосы шириной 38 мм, поверх которой была установлена узкая полоса шириной 25 мм.

В испытаниях использовались следующие средства измерения, вспомогательные устройства и программное обеспечение: 2 микрофона диффузного поля (тип V&K 4942); 8 акселерометров (PCB, тип 352B10); 2 источника звука (тип Yamaha DSR115) со встроенным усилителем сигнала; система сбора и анализа данных (тип V&K 3560C); программное обеспечение PULSE (тип V&K 7700-N10).

Возбуждение панели производилось в широкой полосе частот белым шумом при времени съема данных  $T = 40$  с. Широкополосный анализ проводился в третьоктавных полосах частот в диапазоне 50–10000 Гц. По результатам этого анализа были определены средние уровни виброускорений панели при ее акустическом возбуждении и эффективность применения различных вариантов облицовки. Кроме того, в режиме реального времени проводился узкополосный анализ в диапазоне частот 0–800 Гц с шагом дискретизации  $\Delta f = 1$  Гц. По результатам узкополосного анализа определялись формы колебаний панели на собственных частотах для лучшего понимания механизма влияния того или иного фактора на колебания панели.

**Натурные испытания.** Стенд АС-14 является реальным самолетом Як-42, стоящим на открытой площадке. Фюзеляж представляет собой цельнометаллическую клепано-клеесварную конструкцию. В средней части сечения фюзеляжа круглое, диаметром 3.8 м. Толщина обшивки в надкрыльевой зоне, где проводились измерения, составляет 1.8 мм.

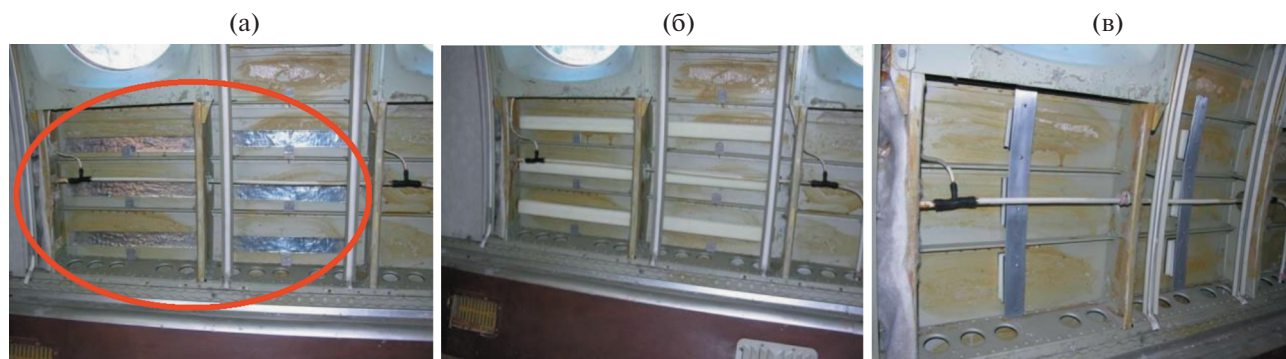
Для проведения испытаний были выбраны три зоны, которые в условиях полета могут быть подвержены наибольшему воздействию акустиче-

ских нагрузок от силовой установки самолета. Первая зона – это бортовая конструкция фюзеляжа самолета; вторая зона – нижняя поверхность закрылка; третья зона – нижняя поверхность крыла. На рис. 2а, 2б исследуемые зоны обведены красными овальными линиями.

При проведении экспериментальных исследований на стенде АС-14 использовалась та же аппаратура, что и при экспериментах на АК-11. Единственное отличие заключалось в том, что вместо двух звуковых колонок использовалась одна, располагаемая вблизи облучаемой поверхности, как это показано для первой зоны на рис. 2а. Измерения вибраций конструкции проводились с помощью восьми вибродатчиков, установленных на поверхности, облучаемой звуком. Один из датчиков был опорным, а семь – подвижными. Схема расположения датчиков в каждой зоне также показана на рис. 2а и 2б.

При подготовке к проведению испытаний на фюзеляже были сняты панели интерьера и удалена штатная теплозвукоизоляция с трех пролетов между шпангоутами 46–49 со всех шпаций ниже багажной полки. Измерения проводились на шести шпациях, расположенных ниже окна. Зона измерений выделена на рис. 3а красным овалом. Семь датчиков устанавливались в центр шпации либо вдоль стрингера и последовательно перемещались снизу вверх от 1-го до 5-го сечения. На борту самолета было исследовано пять вариантов конструкции. Вариант 1 – конструкция без облицовки. Варианты 2 и 3 – в шпациях наклеена одна (рис. 3а) и две полосы СКЛГ. В варианте 4 I-демпфер наклеивался в шпациях поверх полосок вибропоглощающего материала ВТП-1В толщиной 1.5 мм, как это показано на рис. 3б. В варианте 5 вибропоглощающая конструкция состояла из имитатора шпангоута с демпфирующим сэндвичем, расположенным поперек шпаций. Сэндвич состоял из I-демпфера, окруженного с двух сторон материалом ВТП-1В толщиной 1.5 мм.





**Рис. 3.** Зона измерений на фюзеляже с облицованными шпациями (а); I-демпферы в шпациях (б); имитаторы шпангоутов с двусторонними сэндвичами (в).

В качестве имитатора шпангоута служила одна дюралевая полоса шириной 38 мм (рис. 3в).

На крыле и на закрылке были испытаны варианты облицовки конструкции с различным количеством полос из материала СКЛГ-6020М, ВТП-1В, а также с I-демпферами, наклеенными на полоски из ВТП-1В. Процедура измерений не отличалась от процедуры, примененной на стенде АК-11.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Анализ экспериментальных данных, полученных в результате проведения испытаний, проводился в третьоктавных и в узких полосах частот с тем, чтобы достаточно подробно изучить выявленные эффекты и лучше понять физические процессы, лежащие в их основе. Так как такой анализ выходит за рамки данной статьи, наиболее важные результаты представлены в октавных полосах частот для того, чтобы второстепенные детали не мешали увидеть обобщенную картину. Заметим, что измерения в октавных полосах частот не проводились. Октавные уровни были рассчитаны на основе измеренных третьоктавных уровней.

Всего в работе были исследованы следующие средства снижения вибраций конструкции:

- изменение граничных условий шпангоутов;
- изменение жесткости шпангоутов;
- применение имитаторов шпангоутов, в том числе в комплекте с двусторонними вибродемпфирующими сэндвичами;
- облицовка конструкции односторонними вибродемпфирующими сэндвичами;
- применение имитаторов стрингеров в комплекте с двусторонними вибродемпфирующими сэндвичами;
- облицовка конструкции материалом ВТП-1В и СКЛГ-6020М.

Все исследованные средства показали свою эффективность на различных конструкциях и в

разных частотных диапазонах. Всего исследовано 18 вариантов облицовки на тестовой панели регионального самолета и 15 вариантов облицовки на бортовой конструкции, закрылке и крыле самолета Як-42 (стенд АС-14). Сразу необходимо отметить, что, так как нижняя поверхность крыла является сильно задемпфированной, ее облицовка по любому варианту практически не влияет на уровни вибраций, т.е. для изначально нерезонансной конструкции не имеет смысла говорить об эффективности мероприятий, направленных на ее вибродемпфирование. Поэтому ниже обобщены наиболее интересные из результатов, полученных на панели, а также на бортовой конструкции и на закрылке стенда АС-14.

В области самых низких частот, где формы колебаний бортовой фюзеляжной конструкции самолета определяются, в основном, упругими характеристиками шпангоутов, эффективным методом снижения вибраций является настройка конструкции с целью повышения низших собственных частот ее колебаний и уменьшения длин упругих волн. На тестовой панели длина волны низшей формы колебаний может быть уменьшена закреплением концов шпангоутов. На рис. 4а сплошной красной линией показан эффект снижения вибраций панели при закреплении концов шпангоутов. Видно, что максимальная величина этого эффекта достигает 7 дБ в октавной полосе 63 Гц. На реальной фюзеляжной конструкции сложно уменьшить длину волны колебаний шпангоута пассивными методами. Здесь необходимо применение сложных активных систем или настройка динамических виброгасителей. Результат, представленный на рис. 4а, может лишь служить неким ориентиром при выполнении этих мероприятий.

Более реально, но также трудноосуществимо на практике, изменение жесткости шпангоутов. В данной работе не удалось получить положительного эффекта на панели с закрепленными шпангоутами за счет увеличения их жесткости до

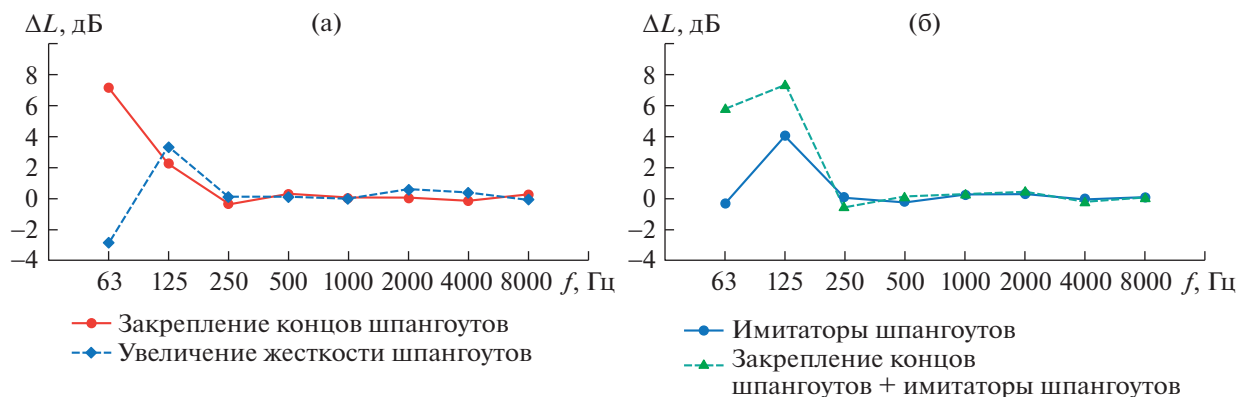


Рис. 4. Эффект снижения вибраций панели при закреплении концов шпангоутов и при увеличении жесткости шпангоутов (а); за счет имитаторов шпангоутов (б).

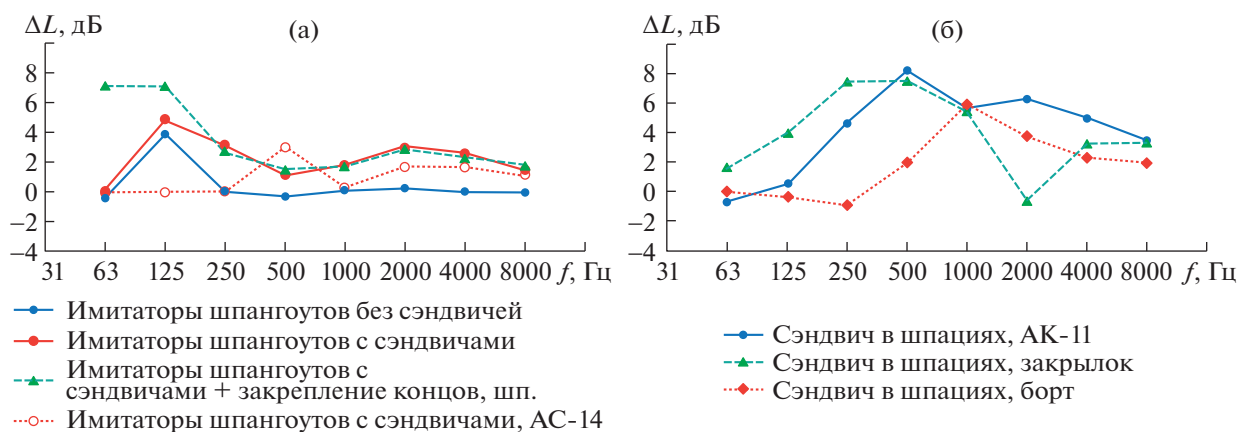


Рис. 5. Эффект снижения вибраций конструкции за счет имитаторов шпангоутов с двусторонним вибродемпфирующим сэндвичем (а); за счет односторонних сэндвичей в шпации (б).

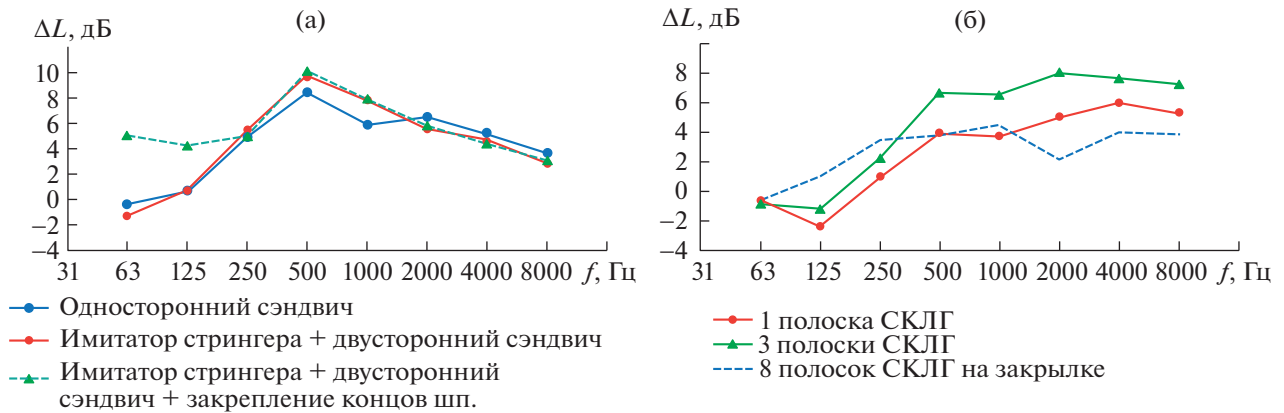
5 раз. Эффект, полученный на панели со свободными концами шпангоутов, показан на рис. 4а синей пунктирной линией. Его величина изменяется от  $-3$  дБ в полосе 63 Гц до  $+3$  дБ в полосе 125 Гц, т.е. в среднем эффективность данного метода нулевая. Для получения положительного эффекта необходимо увеличить жесткость шпангоутов в большей степени в соответствии с результатами предварительных расчетов по настройке конструкции.

Альтернативой настройке шпангоутов является применение имитаторов шпангоутов. На рис. 4б сплошной синей линией представлен эффект уменьшения вибраций панели с закрепленными концами основных шпангоутов за счет применения имитаторов шпангоутов. Видно, что такое средство эффективно только в полосе 125 Гц, где величина эффекта достигает 4 дБ.

Совместный эффект закрепления концов шпангоутов и применения имитаторов шпангоутов показан на рис. 4б пунктирной зеленой лини-

ей. В этом случае максимальный эффект в полосе 125 Гц превышает 7 дБ, а в полосе 63 Гц достигает 6 дБ. Сравнивая рис. 4а и 4б, можно заметить, что сумма эффектов закрепления шпангоутов и применения имитаторов примерно соответствует суммарному измеренному эффекту. Это свидетельствует о том, что для оценки суммарного эффекта различных методов возможно применять простое сложение эффектов, полученных для каждого метода в отдельности.

Более высокую эффективность дает метод применения имитаторов шпангоутов совместно с двусторонним вибродемпфирующим сэндвичем. На рис. 5а показаны значения эффектов уменьшения вибраций панели за счет применения имитаторов шпангоутов без сэндвичей (синяя линия) и с сэндвичами (красная линия). Здесь же зеленой пунктирной линией приведены значения совместного эффекта имитаторов с сэндвичами с учетом закрепления концов шпангоутов.



**Рис. 6.** Эффект снижения вибраций конструкции за счет имитаторов стрингеров с двусторонним вибродемпфирующим сэндвичем (а); за счет облицовки обшивки полосками СКЛГ-6020М (б).

Из рис. 5 видно, что применение сэндвичей расширяет частотную полосу, в которой эффективность имитаторов шпангоутов положительна, до всей частотной оси. Что наиболее существенно, эффективность в полосе 250 Гц увеличивается от 0 до 3 дБ. Дополнительное закрепление концов шпангоутов увеличивает эффект на 2 дБ в полосе 125 Гц и на 7 дБ в полосе 63 Гц, т.е. граничный эффект просто добавляется к эффекту имитаторов с сэндвичами.

Важно, что эффект влияния имитаторов шпангоутов с вибродемпфирующими сэндвичами сопоставимой величины проявляется и на бортовой конструкции реального самолета, пусть и в другой частотной полосе. На рис. 5а эффект, полученный на бортовой конструкции самолета, изображен точечной пунктирной линией.

В октавных полосах частот выше 125 Гц эффективным средством снижения вибраций являются вибродемпфирующие сэндвичи, наклеенные в шпациях панели. На рис. 5б сплошной синей линией показан эффект снижения вибраций панели за счет облицовки ее шпаций такими сэндвичами. Максимальный эффект наблюдается в полосе 500 Гц и его величина достигает 8 дБ.

Важно, что аналогичный эффект выявлен и на других исследованных конструкциях. Эффект, полученный на закрылке самолета, представлен на рис. 5б зеленой пунктирной линией. На частотах менее 1000 Гц он похож на эффект, полученный на панели. Эффект, полученный на борту самолета, показан точечным пунктиром. Его максимальная величина несколько меньше величины эффекта на панели и сдвинута по оси частот. Однако и этот эффект значительный и явно выражен.

Вибропоглощающий эффект сэндвичей может быть увеличен добавлением имитатора стрингера со слоем вибропоглощающего материала на вторую сторону демпфера. На рис. 6а красной линией показан эффект снижения вибраций панели за

счет применения имитаторов стрингеров с двусторонним вибродемпфирующим сэндвичем. Здесь же для сравнения синей линией показан эффект применения односторонних сэндвичей. Можно видеть, что применение имитаторов стрингеров со вторым слоем ВПМ приводит к снижению вибраций на 1–2 дБ в области частот 250–1000 Гц. Максимальный эффект снижения вибраций в данном варианте облицовки панели достигает 10 дБ в октавной полосе 500 Гц.

Зеленой пунктирной линией на рис. 6а показан эффект снижения вибраций панели за счет имитаторов стрингеров с сэндвичами с учетом закрепления концов шпангоутов. Из рис. 6а видно, что дополнительное закрепление шпангоутов приводит к снижению вибраций в полосах частот 63 и 125 Гц на 6 и 3 дБ соответственно, т.е., как и в случае с имитаторами шпангоутов, граничный эффект, изображенный на рис. 4а, просто добавляется к эффекту имитаторов стрингеров с сэндвичами.

В области частот выше 500 Гц эффективным средством снижения вибраций конструкции является облицовка шпаций вибропоглощающим материалом. На рис. 6б приведены эффекты снижения вибраций панели за счет облицовки ее шпаций одной (красная линия) и тремя (зеленая сплошная линия) полосками СКЛГ. При сплошной облицовке шпаций тремя полосками величина эффекта в области частот 500–8000 Гц составляет 7–8 дБ. При этом в области частот 63–125 Гц облицовка шпаций приводит к увеличению вибраций на 1–2 дБ.

На реальной самолетной конструкции эффект облицовки шпаций вибропоглощающим материалом сопоставим с результатами, полученными на тестовой панели. В качестве иллюстрации этого на рис. 6б синей пунктирной линией показаны эффекты облицовки закрылки восемью полосками СКЛГ в соответствии с рис. 2б. Из рис. 6б вид-

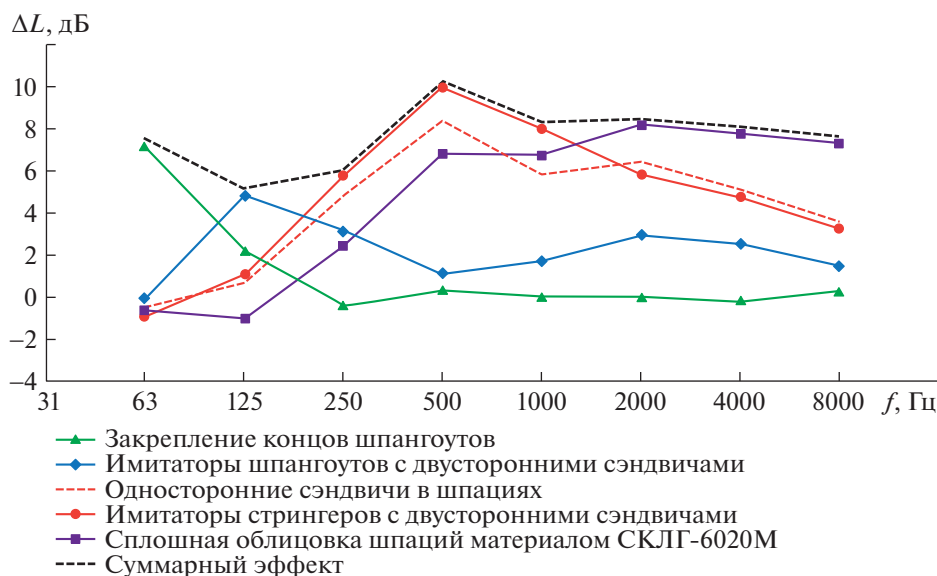


Рис. 7. Эффективность различных средств снижения вибраций панели.

но, что в данном случае эффективность облицовки конструкции полосками СКЛГ на высоких частотах составляет примерно 4 дБ. Заметим, что эффективность материала ВТП-1В сопоставима с эффективностью СКЛГ-6020М.

В качестве обобщения полученных результатов на рис. 7 приведены кривые эффективности различных средств снижения вибраций конструкции, рассмотренные в данной работе.

Из рис. 7 следует, что для эффективного снижения вибраций конструкции необходимо применять различные средства в разных частотных областях. В октавной полосе 63 Гц единственным средством снижения вибраций является уменьшение длины волны колебаний шпангоутов. На тестовой панели этого можно достичь путем фиксации свободных концов шпангоутов (зеленая линия). На реальном самолете для этого требуется применение сложных активных методов либо точная настройка конструкции.

В полосе частот 125 Гц наиболее эффективным методом является применение имитаторов шпангоутов со встроенными двусторонними вибродемпфирующими сэндвичами (синяя линия на рис. 7). Такой сэндвич состоит из I-демпфера, выполненного из легкого жесткого материала, с каждой стороны которого расположена полоска вибропоглощающего материала. Полоски ВПМ могут не приклеиваться к конструкции или к I-демпферу, но должно быть обеспечено их крепкое прижатие по всей площади имитатором шпангоута, иначе материал не будет работать.

В полосах частот 250–1000 Гц для эффективного снижения вибраций конструкции необходимо применять имитаторы стрингеров с двусто-

ронными сэндвичами (красная сплошная линия). Здесь также главным условием их эффективной работы является крепкое прижатие сэндвича к шпации имитатором стрингера. В качестве упрощенного варианта вместо двусторонней конструкции сэндвича с имитатором стрингера можно использовать наклейку в шпации одностороннего сэндвича (красная пунктирная линия). Это несколько снизит эффективность, но значительно упростит и облегчит конструкцию.

Для снижения вибраций конструкции в области частот 2–8 кГц лучше всего облицевать шпации вибропоглощающим материалом. Это может быть материал СКЛГ-6020М (фиолетовая линия), либо ВТП-1В. Эффективность облицовки конструкции этими материалами примерно одинакова. При этом следует учитывать, что при необходимости эффективность покрытия конструкции материалом ВТП-1В может быть увеличена в области средних частот путем наклеивания на него I-демпферов. Аналогичная операция с покрытием СКЛГ не приведет к увеличению его эффективности вследствие различной физической природы диссипации энергии в липковязком слое мастики (СКЛГ) и упругом слое полиуретана (ВТП-1В).

Выше было продемонстрировано, что различные методы снижения вибраций работают независимо друг от друга и для оценки суммарного эффекта нескольких методов возможно простое сложение отдельных эффектов. На рис. 7 черной пунктирной линией нанесена оцененная таким образом суммарная величина максимальных эффектов всех рассмотренных методов. Из рисунка следует, что применение имитаторов шпангоутов и



имитаторов стрингеров с вибродемпфирующими сэндвичами, а также облицовка шпаций вибропоглощающим материалом позволит снизить вибрации конструкции в области частот 250–8000 Гц на 5–10 дБ. Если на конструкции по каким-либо причинам сложно или нежелательно устанавливать имитаторы силовых элементов (например, на закрылке или на стабилизаторе), можно ограничиться ее облицовкой односторонним сэндвичем, состоящим из слоя вибропоглощающего материала ВТП-1В и жесткого легкого I-демпфера. Это обеспечит приемлемое вибродемпфирование в области средних и высоких частот.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 21-71-30016).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев А.Я., Черных В.В. Оценка эффективности вибропоглощающих покрытий с армирующим слоем при различных видах возбуждения подкрепленной панели // Труды ЦАГИ № 2769. 2018. С. 72–78.
2. Зверев А.Я., Лесных Т.О., Паранин Г.В. Исследование эффективности применения вибропоглощающего материала с армирующим слоем для повышения звукоизоляции элементов конструкции фюзеляжа // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 2. С. 82–91.
3. Зверев А.Я., Черных В.В. Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натуральных условиях. Ч. 1. Звукопоглощение и звукоизоляция // Ученые записки ЦАГИ. 2018. Т. 49. № 8. С. 40–55.
4. Зверев А.Я., Семенова Л.П. Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натуральных условиях. Ч. 2. Вибропоглощение // Ученые записки ЦАГИ. 2019. Т. 50. № 1. С. 43–56.
5. Зверев А.Я. Механизмы снижения шума в салоне самолета // Акуст. журн. 2016. № 4. С. 474–479.
6. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // J. Sound Vibr. 2003. V. 262. № 3. P. 457.

## INVESTIGATIONS OF PROMISING MEANS FOR REDUCING VIBRATIONS OF AIRCRAFT STRUCTURES DURING THEIR ACOUSTIC EXCITATION

A. Ya. Zverev<sup>a</sup> and V. V. Chernyh<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Moscow Research Complex Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russia

In reverberation chambers and on a full-scale stand, tests were carried out to determine the vibration characteristics of a typical fuselage panel of a regional aircraft, as well as the side, flap and wing structures of a real aircraft with various vibration damping sets. Under conditions of acoustic excitation of a model panel and real aircraft structures, the effectiveness of the following means of reducing vibrations was determined: changing the boundary conditions and stiffness of the frames; lining the structure with one-sided vibration-damping sandwiches and sheet vibration-absorbing materials VTP-1V, SKLG-6020M; the use of imitators of stringers and frames, including complete with double-sided vibration damping sandwiches. It is shown that, by applying a combination of different methods, it is possible to achieve a significant reduction in structural vibrations in a wide frequency range. At low frequencies, an effective tool is the conversion of long-waveforms of the frame oscillations into shorter-wave ones. In the region of medium frequencies, one-sided sandwiches, as well as stringer simulators together with double-sided sandwiches, effectively reduce vibrations of the structure. In the range of high frequencies, the most effective is the lining of the structure with sheet vibration-absorbing coatings.

*Keywords:* vibration absorption, fuselage structure