АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 65, № 3, с. 362–371

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.
ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

УДК 534.83

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ШУМА РЕАЛИСТИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ ШАССИ

© 2019 г. И. В. Беляев[a], М. Ю. Зайцев[a], В. Ф. Копьев[a, *], И. В. Панкратов[a]

[a]ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ
105005 Москва, ул. Радио 17, Россия

*e-mail: vkopiev@mktsagi.ru

Поступила в редакцию 23.12.2018 г.
После доработки 23.12.2018 г.
Принята к публикации 26.12.2018 г.

Проведено экспериментальное исследование способов снижения шума для реалистичных маломасштабных (1 : 10) моделей шасси самолета, основанных на идее полезной интерференции источников турбулентного следа и наведенных ими отраженных источников, реализуемой с помощью изменения геометрической формы стоек/подпорок, а также на идее непосредственного снижения интенсивности источников в турбулентном следе, реализуемой с помощью обтекателя на колесной тележке шасси. Показана взаимная дополняемость рассматриваемых в работе способов в различных диапазонах частот. Исследуется также влияние угла рысканья на эффективность этих способов снижения шума. Проанализирована их применимость к крупномасштабным моделям.

Ключевые слова: шум шасси, шум обтекания, снижение шума

DOI: 10.1134/S0320791919030018

ВВЕДЕНИЕ

Шум шасси является важным источником шума обтекания элементов конструкции планера при заходе самолета на посадку [1–3], и, следовательно, разработка методов его снижения необходима для обеспечения самолетами ужесточающихся сертификационных норм по шуму на местности. Методы снижения шума шасси включают, среди прочих, обтекатели, разделительные пластины, вдув потока [4] и плазменные актуаторы [5].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния формы обтекаемых поверхностей плохообтекаемых тел (стойки, колесные тележки) на генерацию шума отрывным потоком. Подробно рассматривается способ, предложенный авторами в [6–8] для снижения шума цилиндра и применяемый здесь к маломасштабным (1 : 10) реалистичным моделям шасси. Этот способ основан на идее уменьшения шума цилиндрической стойки за счет полезной интерференции источников турбулентного следа и наведенных ими отраженных источников, реализуемой с помощью изменения геометрической формы стоек/подпорок. Эффект снижения шума достигается за счет размещения жесткой поверхности с малой или нулевой кривизной в зоне отрыва потока вблизи квадрупольных источников шума следа [9]. Особое внимание уделяется шуму от колесной тележки шасси, которая была идентифицирована как важный и даже основной источник шума шасси [10, 11].

В качестве способов снижения шума шасси помимо срезанной формы для основной стойки рассматривались другие модификации задней поверхности основной стойки (призматическая, треугольная и т.д.), а также расположение плоских пластинок вниз по потоку от основной стойки. Исследуемые маломасштабные модели являются упрощенными моделями шасси среднемагистрального пассажирского самолета, и хотя они и не предполагают воспроизведение мелких элементов реальных шасси, их можно рассматривать как достаточно реалистичные для исследования того, работают ли упомянутые выше способы снижения шума обтекания простейших тел для комбинации тел сложных геометрий и следует ли эти способы переносить на большие масштабы.

Рассмотрено также влияние угла рысканья шасси (например, из-за бокового ветра) на способность снижения шума для исследуемых способов. С физической точки зрения можно ожидать, что ненулевой угол рысканья приведет к существенному ухудшению эффективности рассматриваемых технологий снижения шума, что делает необходимым экспериментальное исследование и оценку данного эффекта.

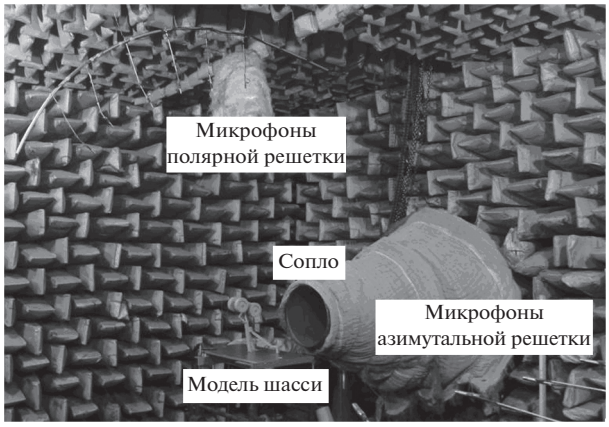

Рис. 1. Модели шасси в акустической заглушенной камере с потоком АК-2 ЦАГИ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ГЕОМЕТРИЯ МОДЕЛЕЙ

Испытания проводились в заглушенной камере с потоком АК-2 ЦАГИ. АК-2 является заглушенной установкой с открытым рабочим контуром для исследования шума струи и шума обтекания. Поток истекает в заглушенную камеру, имеющую размеры 9.6 × 5.5 × 4.0 м. Стены заглушенной камеры облицованы акустическими полиуретановыми клиньями, обеспечивающими отклонение от условий свободного поля не более 1 дБ в рабочей полосе частот 200–20000 Гц для звуковых волн с интенсивностью не более 160 дБ.

Общий вид экспериментальной установки при испытаниях моделей шасси приведен на рис. 1. Модель шасси устанавливалась на плоской пластине, расположенной на линии кромки сопла. Сопло имело диаметр 40 см, расстояние между положением модели и кромкой сопла составляло 40 см, так что модель была расположена в основном в слаботурбулизированном потоке (турбулентность $\varepsilon_x \sim 0.5\%$).

Акустические измерения проводились с помощью 12 микрофонов ½″ Bruel & Kjaer 4189 с предусилителями 2669 (частотный диапазон 40 Гц–25.6 кГц, чувствительность 50 мВ/Па). Сбор и обработка данных осуществлялись с помощью 20-канальной системы Bruel & Kjaer PULSE 3560D. Калибровка микрофонов выполнялась с помощью пистонфона Bruel & Kjaer 4228. Микрофоны располагались в двух плоскостях по направлению вдоль потока: сбоку от шасси и в направлении под шасси, образуя азимутальную и полярную решетки (так как в экспериментах в АК-2 ЦАГИ модель шасси устанавливалась колесной тележкой вверх, микрофоны для измерений шума в направлении под шасси физически располагались в верхней полуплоскости). Эти решетки позволяли исследовать эффективность снижения шума в двух главных направлениях одновременно. Схема расположения микрофонов относительно модели шасси приведена на рис. 2.

Акустические измерения выполнялись для нескольких модификаций шасси с целью определения влияния этих модификаций на уровни шума в дальнем поле. Модификации маломасштабной (1 : 10) модели 4-колесного основного шасси включали в себя различные формы задней кромки основной стойки шасси (рис. 3а, 3б) и установку обтекателя на колесную тележку шасси (рис. 3в, 3г).

Различные реализации способа снижения шума показаны на рис. 4: базовый случай (круглая форма основной стойки), стойка в виде усеченного цилиндра (здесь и далее – стойка со скосом), стойка с плоской, трапециевидной и треугольной задними кромками. Кроме того, на рис. 4а показаны варианты снижения шума с помощью плоской пластинки, установленной вблизи основной стойки шасси на различных расстояниях: 0, 0.1r или 0.2r, где r – радиус основной стойки (с иллюстративными целями плоская пластинка на схеме показана немного толще, по сравнению с радиусом основной стойки, чем в реальных моделях). Модели шасси и пластинки были изготовлены из металла, модификации задней кромки и обтекатель – из пластика с помощью 3D печати.

Были также выполнены испытания с моделью шасси, у которой снята колесная тележка (рис. 5а). Кроме того, были выполнены акустические испытания других типов маломасштабных (1 : 10) моделей шасси, помимо описанного выше 4-колесного основного шасси; а именно, были проведены измерения шума для основного 2-колесного и носового 2-колесного шасси (рис. 5б, 5в).

Для оценки влияния различных параметров потока на шум шасси, испытания проводились при различных скоростях потока (50, 60 и 70 м/с) и углах рысканья (+5°, 0° и –5°). Значение для угла рысканья 5° было выбрано, с одной стороны, как верхняя оценка допустимого эффекта бокового ветра при сертификации самолета по шуму на местности, и с другой стороны, как угол, достаточно маленький для того, чтобы не поменять значительным образом среднее течение, так что модификации задней части основной стойки шасси находятся внутри зоны отрыва за основной стойкой [9].

Таким образом, в ходе данной экспериментальной работы было исследовано влияние большого количества параметров на шум шасси и проанализирована их эффективность с точки зрения снижения шума. Параметры, изменявшиеся в хо-

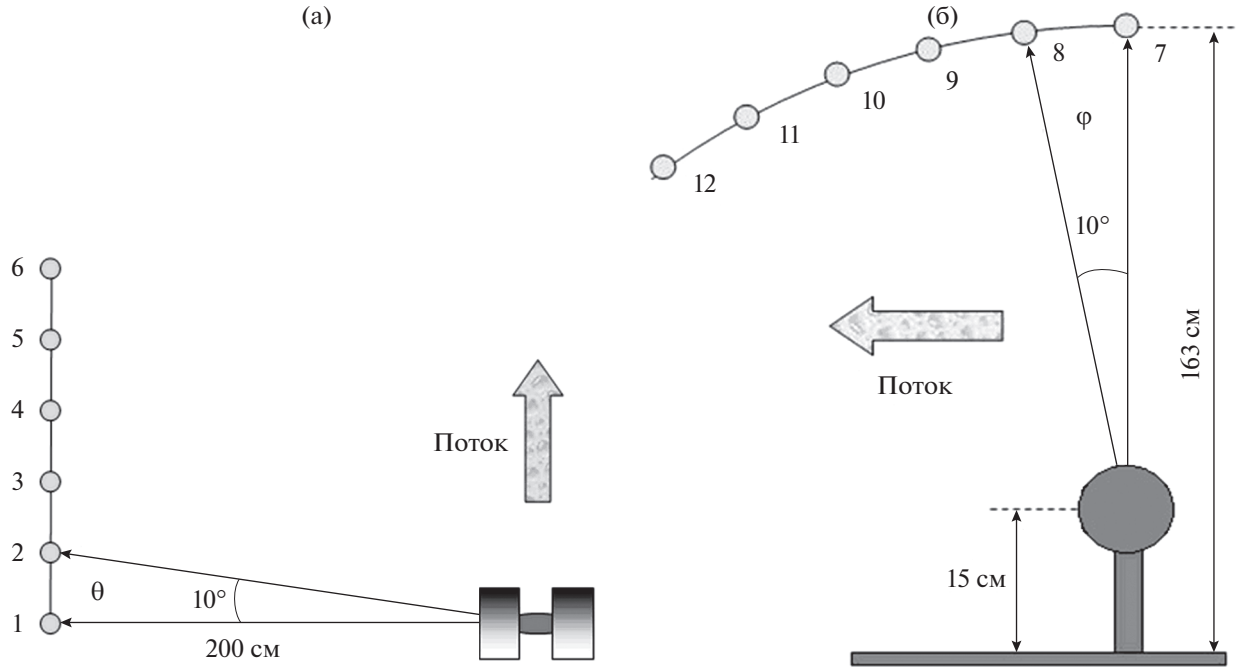

Рис. 2. Схема расположения микрофонов при измерении моделей шасси в АК-2 ЦАГИ: (а) вид сверху, азимутальная микрофонная решетка (микрофоны № 1–№ 6); (б) вид сбоку, полярная микрофонная решетка (микрофоны № 7–№ 12).

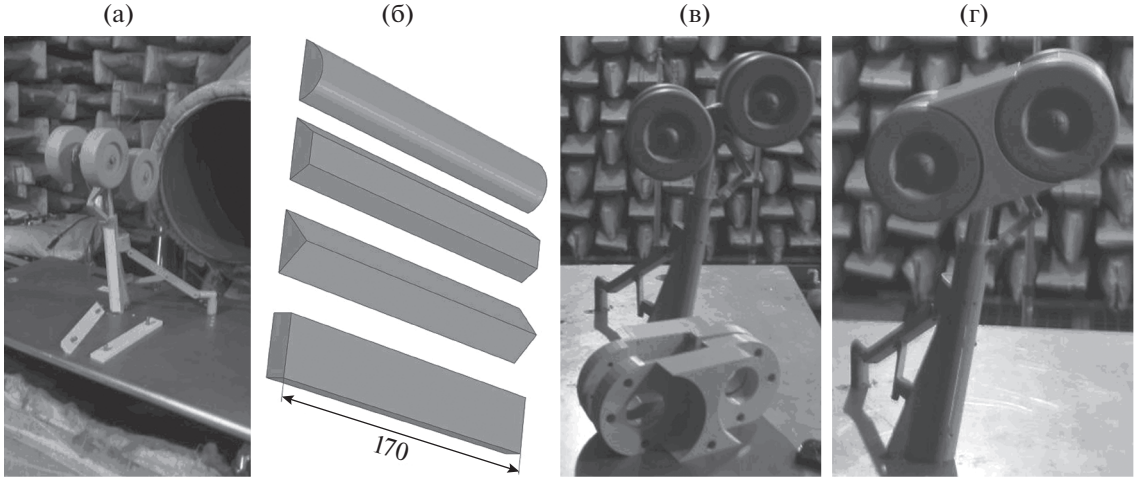

Рис. 3. (а) Модель шасси с различными модификациями задней кромки, (б) 3D модели исследованных накладок на основную стойку шасси, все накладки имеют одинаковую площадь омываемой поверхности, (в) фотография модели шасси и обтекателя, (г) модель шасси с установленным обтекателем.

де акустических испытаний маломасштабных моделей шасси в АК-2 ЦАГИ, приведены в таблице.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Прежде всего была проведена проверка фонового шума. Шум, создаваемый потоком в отсутствие модели шасси, но при наличии пластины, на которую устанавливается шасси, сравнивался с шумом при наличии установленной модели шасси – см. рис. 6. Как видно из рисунка, шум шасси значительно больше, чем фоновый шум во всем диапазоне частот для направления сбоку от шасси и в диапазоне частот больше ~500 Гц для направления снизу от шасси. Этот вывод справедлив для всех точек наблюдения (рис. 2) и исследованных скоростей потока.

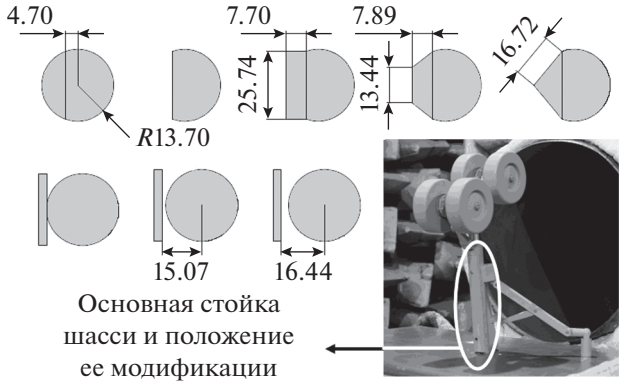

Рис. 4. Различные модификации геометрии основной стойки шасси.

Изрезанность спектров шума шасси для направления снизу от шасси (рис. 6б) может быть связана с эффектом отражения звука от пластины, на которой устанавливалась модель шасси, и последующей интерференцией прямого и отраженного акустических сигналов [13].

В дальнейшем для всех узкополосных спектров была выполнена поправка на фоновый шум, под которым понимался шум потока в отсутствие шасси (но при наличии пластины). Поправка применяется к измеренным данным, если уровень фонового шума L_B по крайней мере на 3 дБ ниже общего измеренного уровня шума L_T. Если общий уровень шума превышает фоновый шум меньше, чем на 3 дБ, эта поправка вносит слишком большие ошибки, и в этом случае истинный уровень источника шума не может быть восстановлен из экспериментальных данных. Математически, поправка выражается соотношением

$$L = 10\lg\left(10^{L_T/10} - 10^{L_B/10}\right),$$
$$\text{если } L_T - L_B > 3.0 \text{ дБ},$$

где L – скорректированный уровень шума в децибелах.

Стоит также отметить, что для всех приведенных на рис. 6 моделей шасси высокочастотная часть спектра шума (частоты выше 3500–4000 Гц) практически идентична. Это может быть связано с тем, что она определяется маломасштабными элементами шасси, которые для всех трех рассматриваемых моделей шасси максимально упрощены и, как следствие, близки друг к другу.

Влияние скорости набегающего потока на спектры шума шасси показано на рис. 7 для микрофона №1 (направление сбоку от шасси) для модели 4-колесного основного шасси (модель А). Видно, что максимум спектра с увеличением скорости потока смещается в сторону бóльших частот, что свидетельствует о масштабировании данного механизма шума по числу Струхаля St (St $= fD/V$, где f – частота звука, D – характерный геометрический размер модели, V – скорость набегающего потока). Однако в области высоких частот (выше 700–1000 Гц) с ростом скорости увеличивается только амплитуда спектра, но сдвига по частоте не происходит, что соответствует масштабированию по числу Гельмгольца He (He $= 2\pi fD/c_0$, где c_0 – скорость звука).

На рис. 8 представлены результаты масштабирования спектров шума для модели основного 4-колесного шасси по числу Гельмгольца в соответствии с выражением

$$L_{sc} = L + n10\lg\left(\frac{V}{V_{ref}}\right)$$

для двух значений n: 6 и 7. Здесь L_{sc} – отмасштабированный уровень шума в дБ, V_{ref} – референсная скорость потока (в данной работе она полагалась равной 70 м/с), n – показатель степенной зависимости уровня шума от скорости потока $p \sim V^n$. Видно, что хотя в обоих случаях расхождения между отмасштабированными спектрами достаточно небольшие, в области средних и высоких

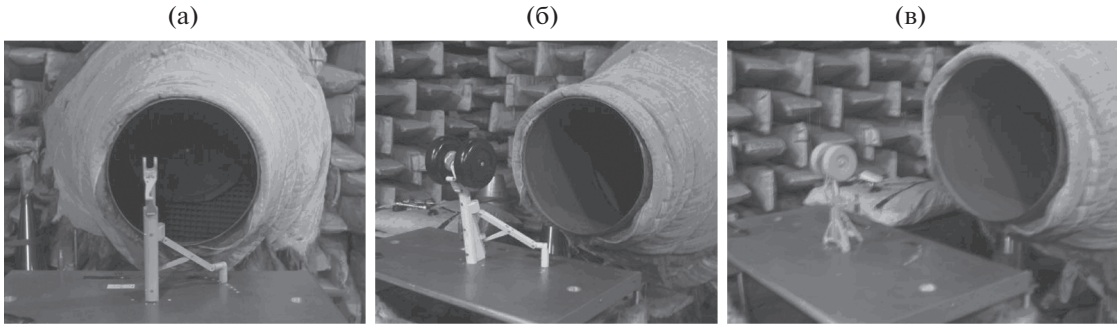

Рис. 5. Фотография модели (а) основного шасси со снятой колесной тележкой; (б) 2-колесного основного, (в) 2-колесного носового шасси.

Таблица 1. Список параметров при испытаниях маломасштабных моделей

№	Параметр	Значения параметра
1	Тип шасси	– основное 4-колесное (А) – основное 2-колесное (Б) – носовое 2-колесное (В)
2	Скорость потока	50, 60 и 70 м/с
3	Угол рысканья	+5°, 0° и –5°
4	Колесная тележка	– установлена – снята
5	Модификация основной стойки	– базовая стойка (без модификаций) – стойка со скосом – треугольная насадка на заднюю кромку – трапециевидная насадка на заднюю кромку – плоская насадка на заднюю кромку
6	Плоская пластинка вниз по потоку от основной стойки	– установлена на расстоянии 0, 0.1r и 0.2r – отсутствует
7	Обтекатель	– установлен – снят

частот лучшее совпадение спектров дает масштабирование по числу Гельмгольца при $n = 7$. Аналогичный вывод был получен и для других микрофонов. Это заключение соответствует результатам [12, 13].

Приведенные выше спектры были получены для полной модели 4-колесного основного шасси с установленной колесной тележкой. Однако представляет интерес сравнить эти результаты со спектрами шума шасси со снятыми колесами, чтобы оценить относительный эффект влияния колес на шум шасси. Такое сравнение приведено на рис. 9. Видно, что установка колес приводит к увеличению шума в области частот 1–7 кГц и практически не влияет на шум в низкочастотном диапазоне (200 Гц–1 кГц). Это означает, что в низкочастотной области, включающей максимум в спектре всего шасси (частоты 500–700 Гц), шум шасси определяется обтеканием основной стойки, способы снижения шума для которой отличаются от способа снижения для колесной тележки.

Перейдем теперь к рассмотрению способов снижения шума шасси. На рис. 10 показаны спектры шума основного 4-колесного шасси для двух способов снижения шума: скос основной стойки шасси и обтекатель. Скос стойки эффективно снижает шум в области максимума спектра для направления сбоку от шасси (микрофон № 1) и практически не влияет на шум для направления вниз от шасси (микрофон № 7). В свою очередь обтекатель дает снижение шума в области высоких частот (больше 2 кГц), то есть в той области частот, где установка колес приводит к усилению шума (см. рис. 9). При этом в области низких частот, включая максимум шума шасси, обтекатель может вызвать даже некоторое усиление шума. Таким образом, эти два способа снижения шума шасси представляются взаимодополняющими.

Как уже отмечалось выше, одна из задач данного исследования состояла в проверке работоспособности метода снижения шума на основе плоской задней поверхности у стойки шасси при наличии ненулевого угла рысканья. Соответствующее сравнение проведено на рис. 11 для спектров шума модели 4-колесного основного шасси при двух углах рысканья: –5° и +5°.

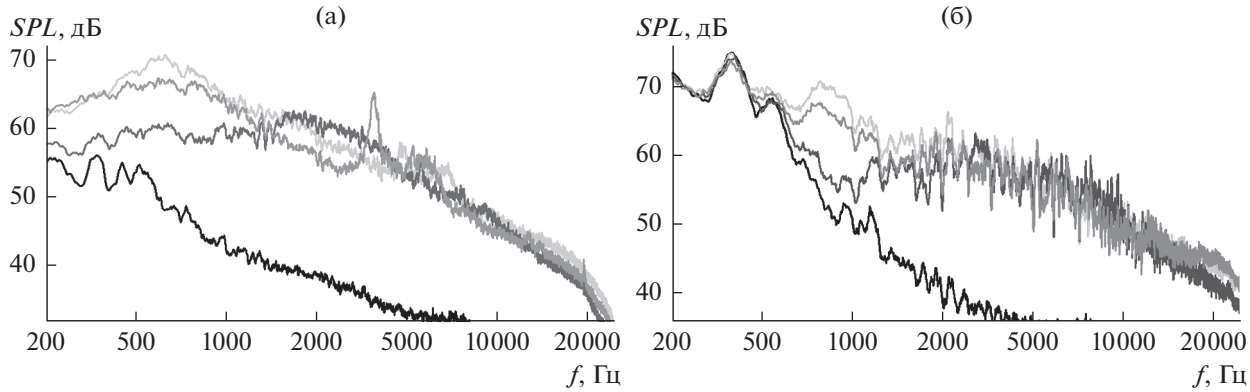

Рис. 6. Сравнение узкополосных спектров шума шасси и фонового шума, скорость потока 70 м/с: (а) микрофон № 1, (б) микрофон № 7. Черная кривая – фон, светло-серая – шум модели А, серая – шум модели Б, темно-серая – шум модели В (А, Б, В – см. таблицу, п. 1).

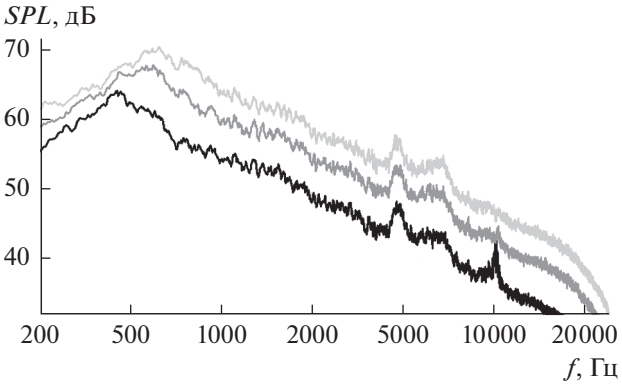

Рис. 7. Спектр шума для модели основного 4-колесного шасси для микрофона № 1 при различных скоростях набегающего потока: 50 м/с (черная кривая), 60 м/с (серая кривая) и 70 м/с (светло-серая кривая).

Приведенные на рис. 11 спектры показывают, что при данных углах рысканья эффективность снижения шума с помощью скоса стойки шасси аналогична ситуации с нулевым углом рысканья: для направления сбоку от шасси стойка со скосом дает снижение в максимуме спектра шума при обоих углах рысканья (для направления вниз от шасси скос стойки не оказывает влияния на шум шасси, как и для базового случая без угла рысканья, и на рис. 11 не приводится). Таким образом, можно сделать важный вывод о работоспособности метода снижения шума шасси с помощью скоса стойки и при наличии малого угла рысканья.

Рассмотрим теперь описанные выше эффекты снижения шума шасси на других микрофонах. Для оценки величины снижения шума будем рассматривать выражение

$$\Delta = L_{\text{mod}} - L_{\text{ref}},$$

где L_{ref} – общий уровень шума в децибелах для базовой модели шасси, а L_{mod} – общий уровень шума для модифицированной модели шасси. Под общим уровнем шума здесь понимается шум в полосе частот, где шум шасси по крайней мере на 3 дБ превышает фоновый шум (см. рис. 6). Направленность величины Δ от угла наблюдения для модели 4-колесного основного шасси со скосом стойки приведена на рис. 12 для различных скоростей потока.

Для полярной микрофонной решетки скос стойки приводит к незначительному изменению общего уровня шума как в конфигурации с колесами, так и без них, находящемуся в пределах точности акустического эксперимента. Заметный и устойчивый эффект снижения шума при модификациях стойки шасси проявляется только в направлении азимутальной решетки, поэтому приводятся данные только в этом направлении.

Стоит также обратить внимание на то обстоятельство, что в отсутствие колес скос стойки шасси приводит к монотонному увеличению Δ (величины снижения шума шасси) во всем диапазоне рассмотренных углов (рис. 12а), тогда как при наличии колес не только эффект снижения шума ослабевает, но и теряется монотонная зависимость от скорости (рис. 12б). Это связано с тем фактом, что по мере увеличения скорости потока шум обтекания колес также возрастает, так что снижение шума в максимуме спектра за счет скоса стойки компенсируется увеличением шума колес в диапазоне средних и высоких частот (см. рис. 9).

Эффективность других модификаций задней кромки основной стойки шасси с точки зрения снижения шума показана на рис. 13 для различных скоростей набегающего потока. Стоит отметить, что плоская насадка продемонстрировала даже большую величину снижения шума, чем

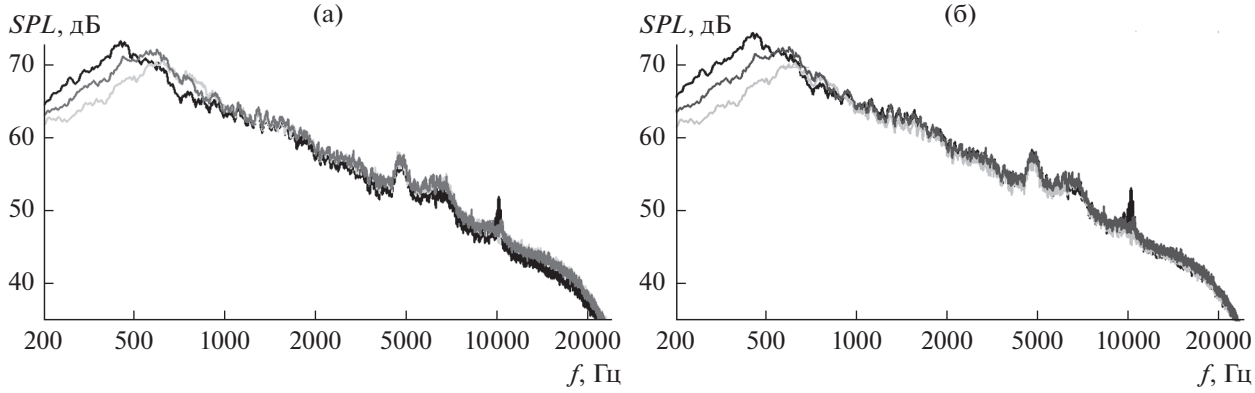

Рис. 8. Результаты масштабирования спектров шума для модели основного 4-колесного шасси для микрофона № 1: (а) $n = 6$, (б) $n = 7$.

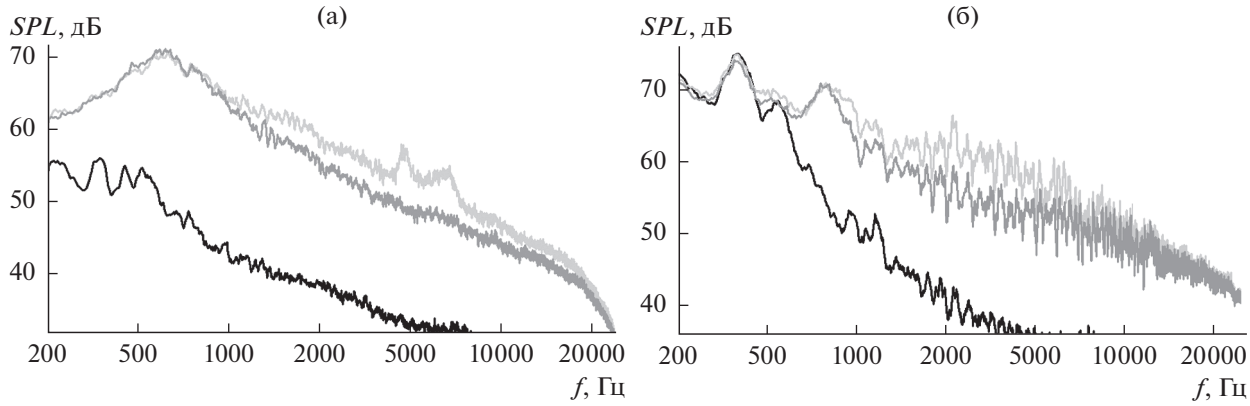

Рис. 9. Спектры шума модели основного 4-колесного шасси при скорости потока 70 м/с: (а) микрофон № 1, (б) микрофон № 7. Черная кривая – фоновый шум (пластина без шасси), серая – шасси без колес, светло-серая – шасси с колесами.

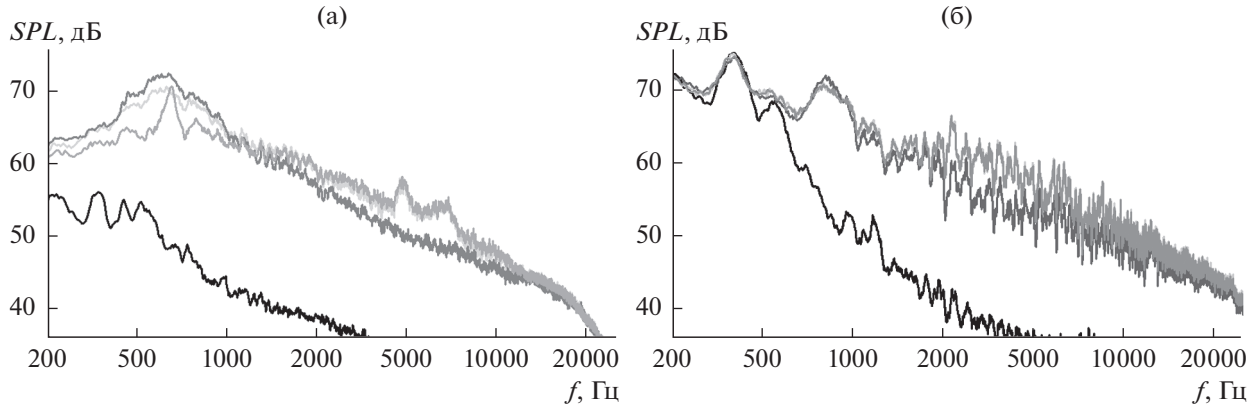

Рис. 10. Спектры шума модели основного 4-колесного шасси при скорости потока 70 м/с: (а) микрофон № 1, (б) микрофон № 7. Черная кривая – фон, светло-серая – базовая модель шасси, серая – стойка со скосом, темно-серая – шасси с обтекателем.

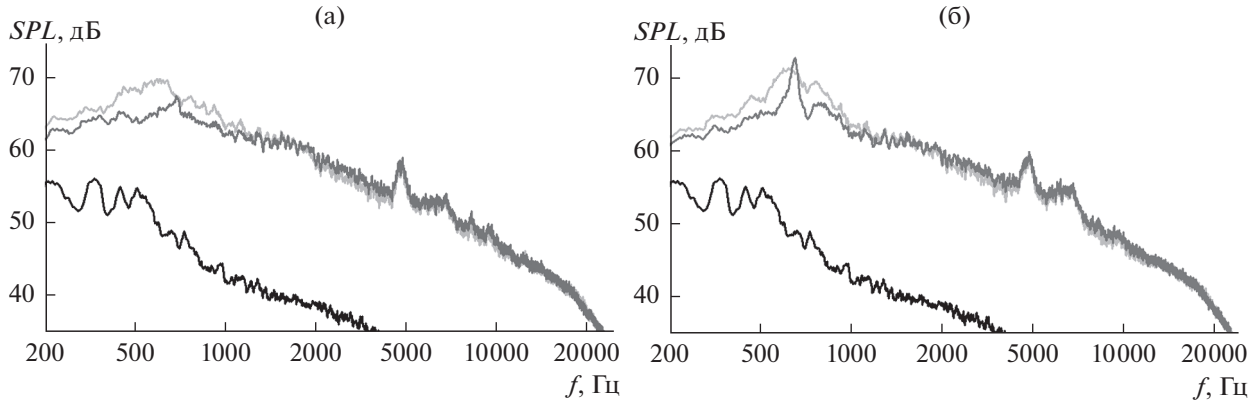

Рис. 11. Спектры шума модели основного 4-колесного шасси при скорости потока 70 м/с, микрофон № 1. Черная кривая – фоновый шум, светло-серая – базовая модель шасси, темно-серая – модель со скосом стойки. (а) Угол рысканья –5°, (б) угол рысканья +5°.

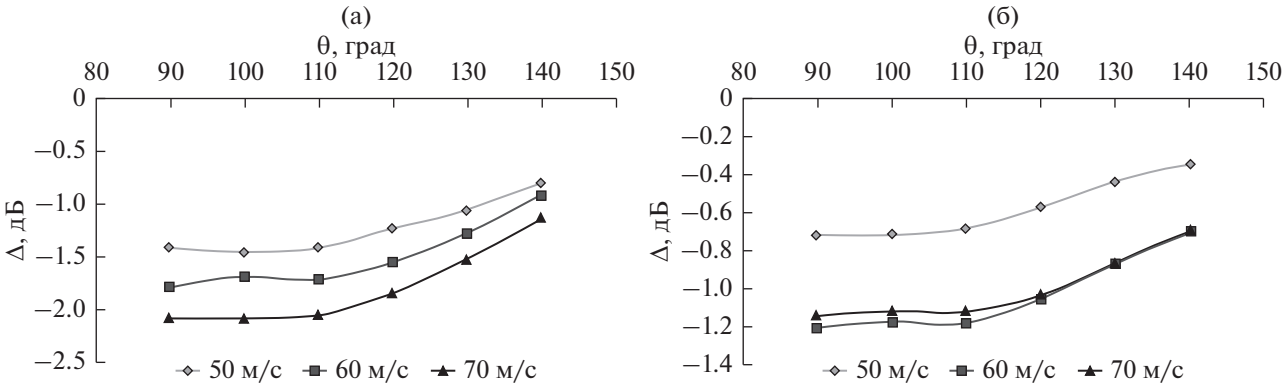

Рис. 12. Влияние скоса основной стойки для различных скоростей потока на шум шасси А для угла рысканья 0° с использованием азимутальной микрофонной решетки; (а) со снятыми колесами, (б) с установленными колесами.

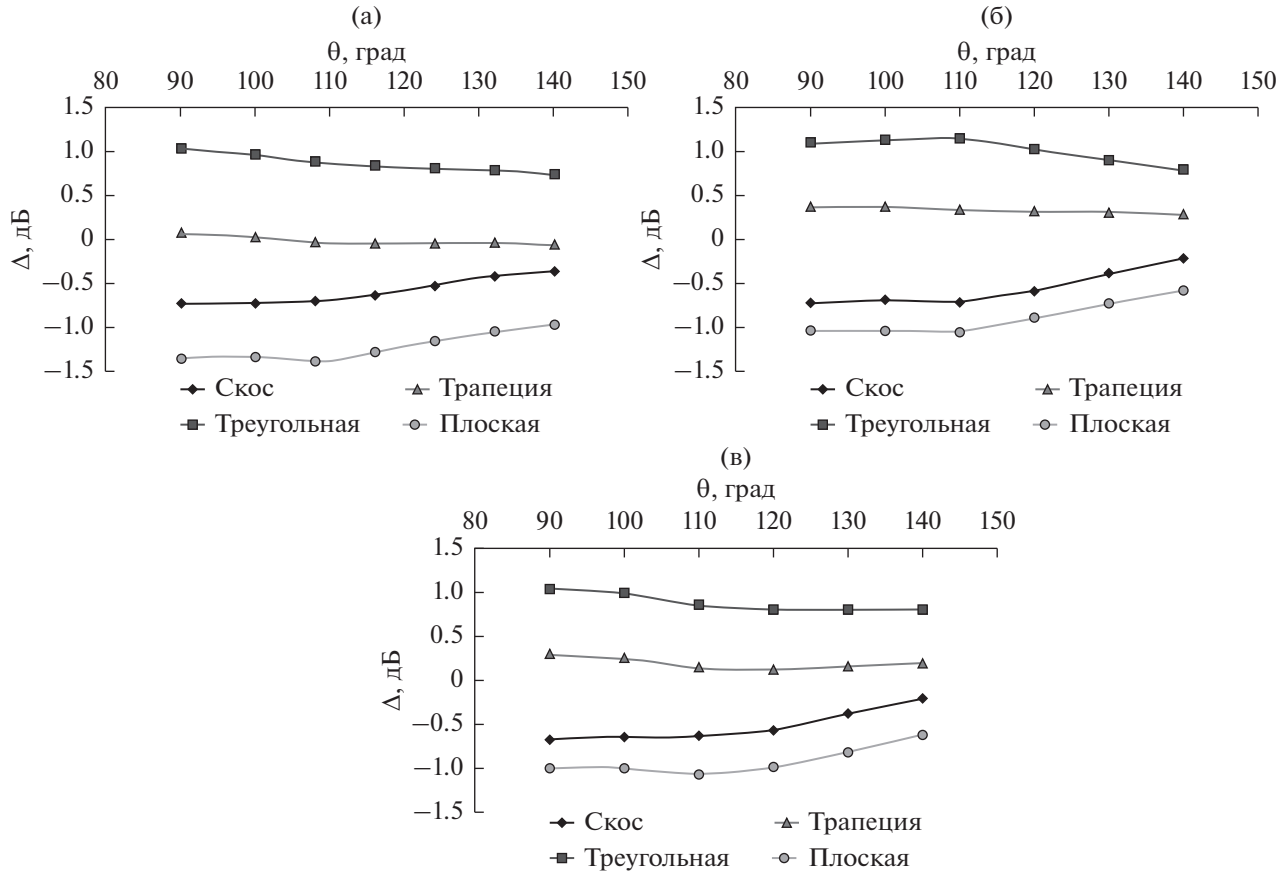

Рис. 13. Влияние различных модификаций стойки на шум шасси А при наличии колес и угле рысканья 0° для скорости (а) 50, (б) 60, (в) 70 м/с.

простой скос стойки шасси, тогда как треугольная насадка привела, наоборот, к увеличению уровня шума. Трапециевидная насадка практически не повлияла на общие уровни шума модели шасси. Полученные результаты подтверждают работоспособность метода снижения шума шасси с помощью формирования плоской поверхности в районе задней части стойки даже для реалистичных моделей шасси. Эти выводы остаются справедливыми и при ненулевых углах рысканья.

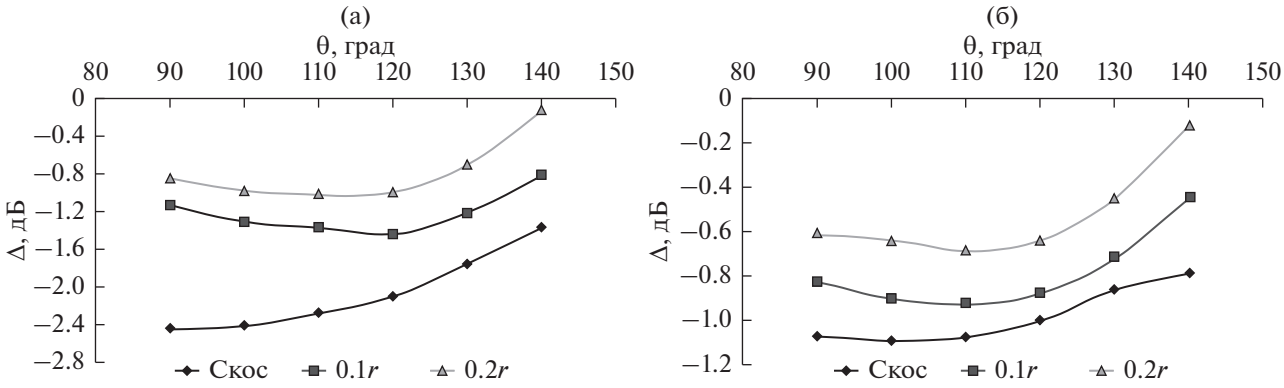

Рис. 14. Влияние установки пластинок с тыльной стороны стойки шасси на шум для модели А при угле рысканья 0°. Черная кривая – стойка со скосом, темно-серая – пластинка на расстоянии от стойки 0.1*r*, светло-серая – пластинка на расстоянии от стойки 0.2*r*; (а) со снятыми колесами, (б) с установленными колесами.

Влияние плоских пластинок, установленных за стойкой вниз по потоку, показано на рис. 14. Видно, что установка пластинок также приводит к снижению шума шасси, однако их эффект меньше, чем эффект скоса стойки.

Влияние обтекателя продемонстрировано на рис. 15, где показаны зависимости величины Δ от угла наблюдения для модели 4-колесного основного шасси с обтекателем для различных скоростей потока (полярная микрофонная решетка). В направлении сбоку от шасси (азимутальная микрофонная решетка) обтекатель приводит к небольшому увеличению шума, сравнимому с точностью акустического эксперимента, тогда как в направлении вниз от шасси имеет место устойчивый эффект снижения шума, который практически не зависит от скорости потока.

На рис. 16 проведено сравнение эффективности снижения шума для плоской насадки на стойку шасси, являющуюся наилучшим из рассмотренных решений снижения шума основной стойки, и для обтекателя тележки. Видно, что оба метода действительно обеспечивают снижение шума в соответствующих направлениях и тем самым взаимно дополняют друг друга.

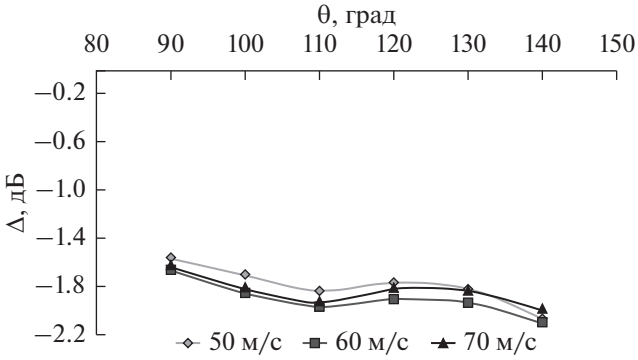

Рис. 15. Влияние обтекателя для различных скоростей потока на шум шасси А для угла рысканья 0°, полярная микрофонная решетка.

Следует отметить, что способность рассмотренных в работе методов снижать шум при наличии угла рысканья говорит о том, что их можно использовать не только для основной стойки, но и для других частей шасси, таких как цилиндры уборки–выпуска и др. Течение вокруг этих частей шасси может быть довольно сложным, но результаты данного исследования показывают, что метод плоской задней поверхности цилиндра приведет к снижению шума (и, по крайней мере, не приведет к его усилению) даже для сложных течений. Таким образом, представляется интересным исследовать данный метод для крупномасштабных детализированных моделей шасси, где концепция усеченного цилиндра применяется не только к основной стойке, но и к другим частям шасси.

ВЫВОДЫ

Получено, что рассматриваемые способы модификации элементов шасси приводят к снижению общего уровня шума для моделей как с колесами, так и без них. Обнаружено, что эффект сохраняется и при наличии небольшого угла рысканья. Результаты экспериментального исследования показывают, что метод снижения шума основной стойки является устойчивым и эффективным для снижения шума маломасштабных моделей и, следовательно, может быть опробован для применения на крупномасштабных моделях шасси. Данный метод также может применяться к другим цилиндрическим частям шасси, таким как цилиндры уборки–выпуска.

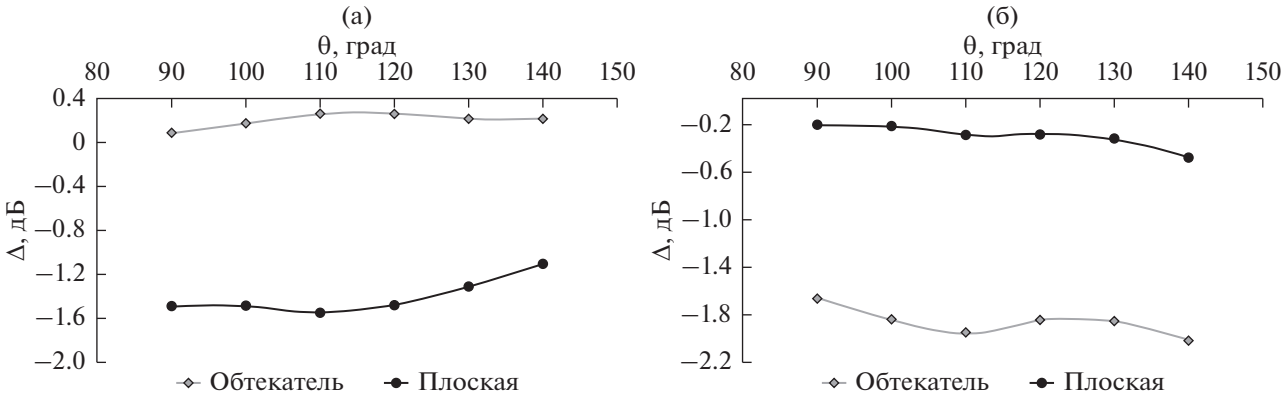

Рис. 16. Сравнение влияния одновременно установленных обтекателя и скоса основной стойки на шум шасси А для угла рысканья 0° и скорости потока 70 м/с. (а) Азимутальная микрофонная решетка; (б) полярная микрофонная решетка.

Показано, что использование обтекателей колесной тележки и изменение формы стойки являются дополняющими друг друга способами снижения шума, эффективными в совокупности во всех направлениях и во всем диапазоне частот.

Результаты данной работы подтверждают основную идею метода снижения шума [9], основанную на размещении твердой поверхности с нулевой кривизной (вместо искривленных твердых поверхностей) вблизи квадрупольных источников шума в тыльной части плохообтекаемого тела.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-11-2018-234, уникальный идентификатор RFMEFI 62718X0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов В.М.* Проблемы снижения шума пассажирских самолетов // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 293–317.

2. *Chow L.C., Mau K., Remy H.* Landing gears and high lift devices airframe noise research // AIAA Paper 2002-2408, 2002.

3. *Stoker R.W., Guo Y., Streett C., Burnside N.* Airframe noise source locations of a 777 aircraft in flight and comparisons with past model scale tests // AIAA Paper 2003-3232, 2003.

4. *Dobrzynski W.* Almost 40 years of airframe noise research: What did we achieve? // J. Aircraft. 2010. V. 47. № 2. P. 353–367.

5. *Копьев В.Ф., Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Казанский П.Н., Копьев В.А., Моралёв И.А.* Управление шумом обтекания цилиндра с помощью плазменных актуаторов высокочастотного диэлектрического барьерного разряда // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 196–198.

6. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф.* Механизм излучения звука турбулентностью вблизи твердого тела // Известия РАН МЖГ. 2008. Т. 43. № 1. С. 98–109.

7. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Ostrikov N.N.* New noise source mechanism of flow/surface interaction as applied to airframe noise reduction // AIAA Paper 2006-2717, 2006.

8. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Зайцев М.Ю.* Исследование механизма шумообразования при обтекании цилиндра применительно к снижению шума шасси перспективного самолета // В сборнике “Авиационная акустика”, Труды ЦАГИ. 2011. Вып. 2695. С. 49–64.

9. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Чернышев С.А.* Способ снижения аэродинамического шума (варианты) // Патент на изобретение № 2293890, приоритет от 4 августа 2005.

10. *Liu W., Kim J.W., Zhang X., Angland D., Caruelle B.* Landing-gear noise prediction using high-order finite difference schemes // J. Sound Vibr. 2013. V. 332. № 14. P. 3517–3534.

11. *Yokokawa Y., Imamura T., Ura H., Kobayashi H., Uchida H., Yamamoto K.* Experimental study on noise generation of a two-wheel main landing gear // AIAA Paper 2010-3973, 2010.

12. *Guo Y., Yamamoto K.J., Stoker R.W.* Experimental study on aircraft landing gear noise // J. Aircraft. 2006. V. 43. № 2. P. 306–317.

13. *Reger R.W., Cattafesta L.N.* Experimental study of the rudimentary landing gear acoustics // AIAA Journal. 2015. V. 53. № 6. P. 1715–1720.