

УДК 534.6

Сравнение акустических характеристик звукопоглощающей конструкции на установке «Интерферометр с потоком» в зависимости от типа акустического сигнала, распространяющегося в турбулентном потоке

Ипатов Максим Сергеевич^()*

maksim.ipatov@tsagi.ru

Остриков Николай Николаевич

nikolay.ostrikov@tsagi.ru

ФАУ «ЦАГИ», Московский комплекс, Москва, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты анализа степени моделирования нелинейного режима работы звукопоглощающей конструкции (ЗПК) на установке «Интерферометр с потоком» («ИсП») ФАУ «ЦАГИ», предназначенной для определения импеданса образцов ЗПК в каналах натурных двигателей. Проведен анализ зависимости извлекаемого импеданса ЗПК на установке «ИсП» от спектрального состава звукового поля. Проведены исследования степени влияния гидродинамических пульсаций давления в турбулентном пограничном слое (ТПС) при высоких скоростях скользящего потока на результаты измерений акустических характеристик ЗПК.

Ключевые слова: ЗПК, турбулентный поток, импеданс, «Интерферометр с потоком», акустические характеристики, широкополосный шум, гидродинамические пульсации давления, нелинейный режим

Comparison of the acoustic characteristics of the liner on an Interferometer with flow installation, depending on the type of acoustic signal propagating in a turbulent flow

Ipatov Maksim Sergeevich^()*

maksim.ipatov@tsagi.ru

Ostrikov Nikolay Nikolaevich

nikolay.ostrikov@tsagi.ru

FAU TsAGI, Moscow Complex, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the results of an analysis of the degree of modeling of the nonlinear operating mode of a sound-absorbing structure (liner) on a TsAGI Interferometer with flow installation designed to determine the impedance of the liner in the duct of full-scale engines. The dependence of the extracted liner impedance on the Interferometer with flow installation on the spectral composition of the sound field is analyzed. Studies have been conducted on the degree of influence of hydrodynamic pressure pulsations in a turbulent boundary layer at high sliding flow velocities on the measurement results of acoustic characteristics of the liner.

Keywords: liner, turbulent flow, impedance, Interferometer with flow, acoustic characteristics, broadband noise, hydrodynamic pressure pulsations, nonlinear mode

Введение. Наиболее эффективным способом снижения шума вентилятора является облицовка каналов двигателя звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), параметры которых подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное затухание звука при его распространении вдоль канала на различных режимах работы двигателя в течение взлетно-посадочного цикла полета самолета. Создание эффективных ЗПК для ТРДД является комплексной проблемой, включающей в себя решение волноводных и дифракционных задач, а также подбор геометрических параметров системы ЗПК, с помощью которых необходимо реализовать заданный оптимальный импеданс в широком диапазоне частот. Применяемые до настоящего времени математические модели, основанные на ряде упрощающих предположений, обеспечивали требуемую эффективность ЗПК. Однако дальнейшее ужесточение норм ИКАО по шуму на местности требует повысить эффективность работы ЗПК, для чего, в частности, необходимо повысить степень подробности моделирования всех процессов при распространении звука в трактах авиадвигателя.

Методы исследования. Исследования проведены на установке «Интерферометр с потоком», предназначенной для измерения импеданса образцов локально-реагирующего типа при наличии, скользящего вдоль лицевой поверхности образцов потока с учетом высоких уровней звукового давления источника звука. Фотография установки и схема рабочей части с нумерацией микрофонов представлены на рис. 1, а, б. На установке используется метод извлечения импеданса ЗПК, описанный в работах [1, 2], который учитывает наличие пограничного слоя в потоке в канале установки «ИсП». В работе использованы стандартные методы кросс-спектрального и автоспектрального анализа данных. В качестве образца для исследования на установке ИсП использована двухслойная конструкция с высотой сотового заполнителя $h_1 = 23$ мм, $h_2 = 7,5$ мм, процент перфорации оболочки $f_1 = 7$ %, $f_2 = 3,5$ %, диаметр отверстий $d_1 = 2$ мм, $d_2 = 2$ мм, толщина перфорированной пластины $t_1 = 1,71$ мм, $t_2 = 0,65$ мм.

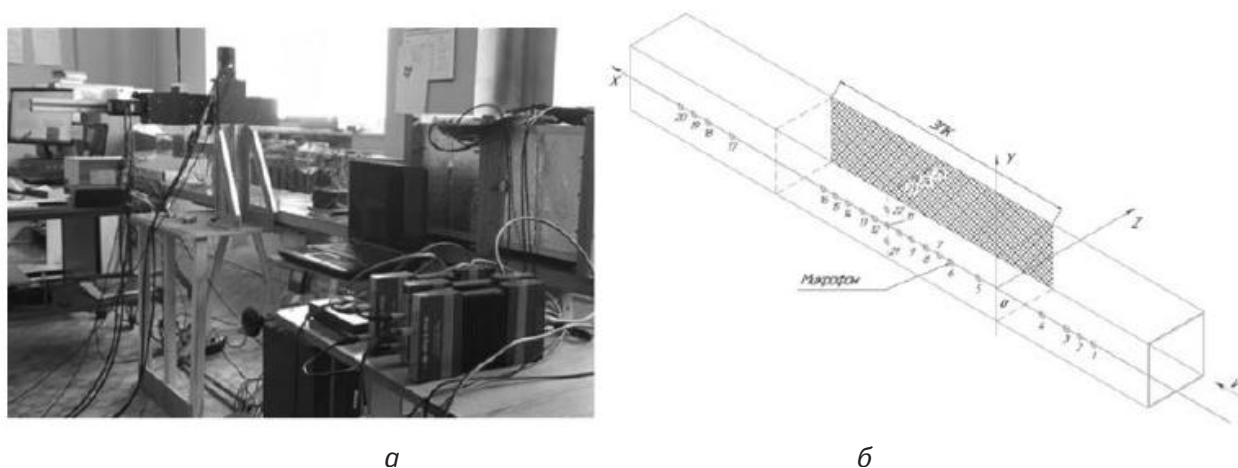


Рис. 1. Установка Интерферометр с потоком ЦАГИ:
а — фото, б — схема рабочей части с нумерацией микрофонов

Результаты. Представленные на рис. 2 спектры показывают, что на установке «ИсП» ЦАГИ можно с избытком моделировать уровни широкополосного шума в ВЗ реального ДУ (максимальный уровень широкополосного шума в канале «ИсП» несколько больше 110 дБ, а в канале современного двигателя находится около 100 дБ). При этом уровни пульсаций давления в турбулентном пограничном слое (ТПС) на рабочих частотах «ИсП» существенно ниже уровней широкополосного шума, генерируемого в канале «ИсП».

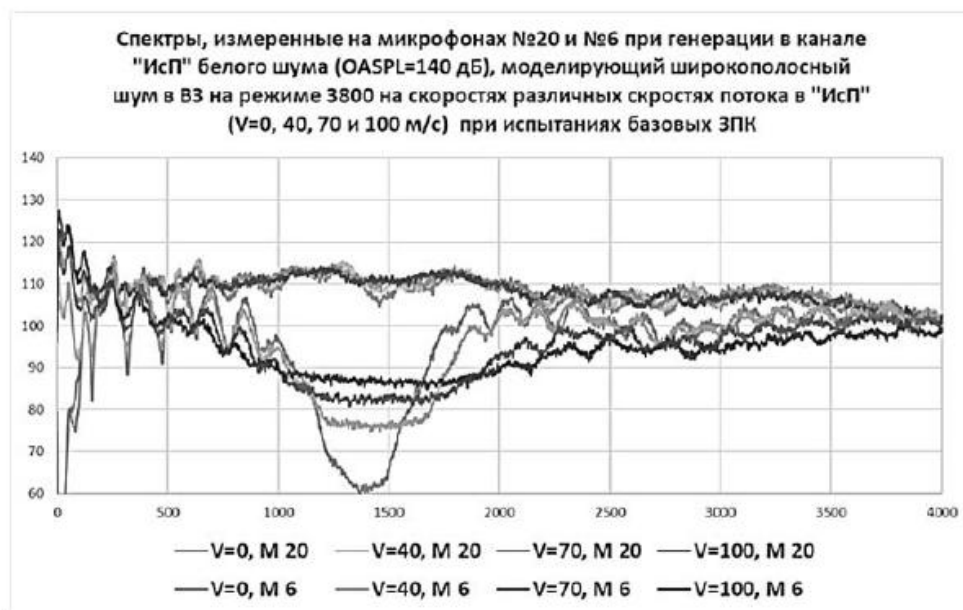


Рис. 2. Спектры на микрофонах № 20 и № 6 установки «ИсП» при генерации максимального широкополосного шума при наличии ЗПК в зависимости от скорости потока, режимы $V_{\max} = 0, 40, 70$ и 100 м/с

На рис. 2 на примере спектров, измеряемых на микрофоне №6 установки «ИсП», продемонстрированы результаты работы ЗПК в канале «ИсП» при генерации максимального широкополосного шума против потока на его различных скоростях $V_{\max} = 0, 40, 70$ и 100 м/с. Микрофон №6 располагается внутри рабочей части установки (рис. 1б) и был выбран потому, что он значительно удален в рабочей части от источника шума (генерация звука производится против потока со стороны микрофона №20) и измерения на нем играют принципиальную роль в процедурах извлечения импеданса ЗПК. Рис. 2 демонстрирует, что в спектре сигнала на частотах в окрестности 1400 Гц наблюдается существенное снижение шума. Причина этого эффекта может быть объяснена на основе значения импеданса этих ЗПК в указанном диапазоне частот находятся в достаточной близости от оптимальных значений импеданса канала установки «ИсП». Рис. 2 также демонстрирует, что при увеличении скорости потока в указанном диапазоне частот (окрестность частоты 1400 Гц) наблюдается увеличение звукового давления на микрофоне №6. Этот эффект никак не связан со снижением эффективности работы ЗПК

в этом диапазоне частот, а возникает из-за того, что с увеличением скорости потока возрастает уровень пульсаций гидродинамического давления в ТПС, в результате чего в этом диапазоне частот измеряемый на микрофоне шум «садится» на гидродинамические пульсации давления. Этот эффект продемонстрирован рис. 3, на котором представлено сравнение спектра, измеренного на микрофоне № 6 на режиме $V_{\max} = 100$ м/с, и спектра гидродинамических пульсаций давления в ТПС.

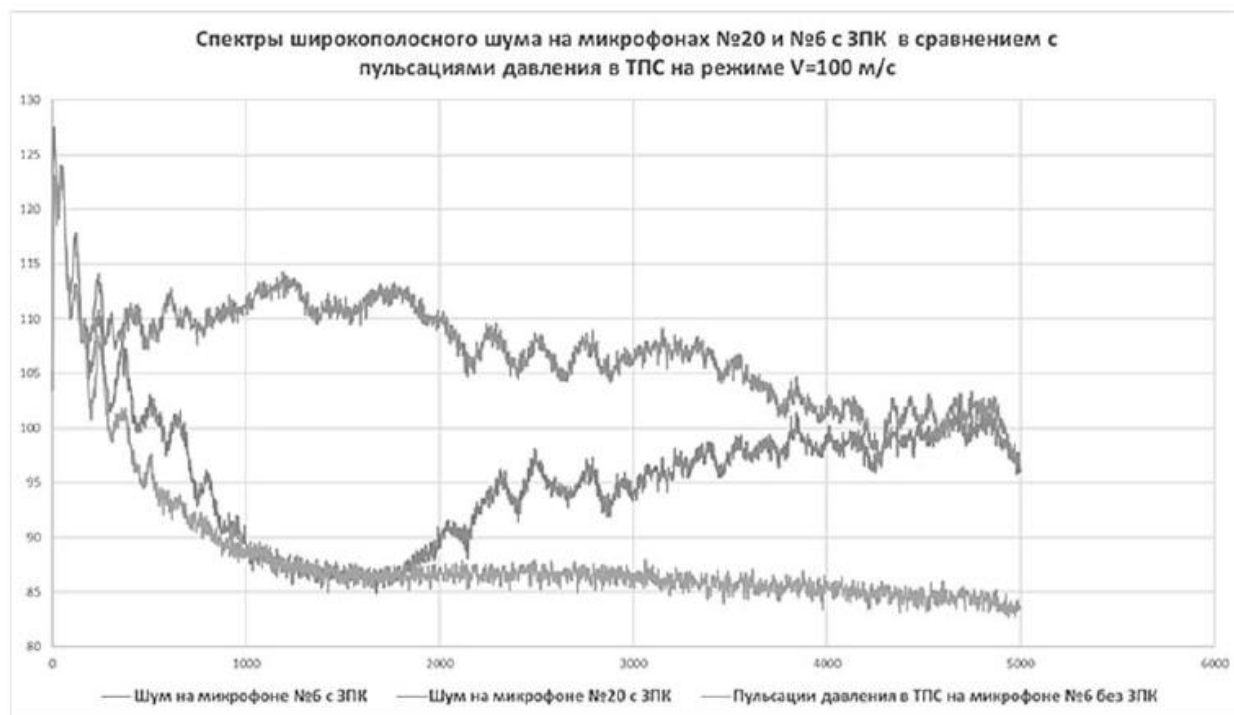


Рис. 3. Сравнение спектра, измеренного на микрофоне № 6 на режиме $V_{\max} = 100$ м/с, и спектра гидродинамических пульсаций давления в ТПС

Для установления зависимости извлекаемого импеданса ЗПК от спектрального состава звукового поля, генерируемого при испытаниях на установке «ИсП», были использованы ЗПК в канале «ИсП» генерировался различный спектральный состав (мультиусинус (МС), белый шум (БШ) и тон) с одинаковым OASPL = 144 дБ на режиме $V_{\max} = 70$ м/с. На рис. 4 результаты сравнения уровней звукового давления и фазы, измеренных на микрофонах №1-№20 установки «ИсП» на частоте 1120 Гц. Проводя анализ результатов, представленных на рис. 4а, необходимо принимать во внимание ту особенность, что различные типы сигналов с одинаковым OASPL имеют на частоте 1120 Гц различные «входные» амплитуды на микрофоне №20, так как одинаковый OASPL распределяется по всему спектру каждого сигнала, а он различен для различных типов сигналов. Эта особенность как раз реализуется в виде различия входных амплитуд, регистрируемых на микрофоне № 20. Рис. 4, а показывает, что, несмотря на различие «входных» амплитуд распределение амплитуд по всем микрофонам оказывается эквидистантным для

различных типов сигнала, т. е. амплитуды для разного типа сигналов пропорциональны между собой на микрофонах установки «ИсП». Рис. 4, б показывает, что разность фаз, регистрируемых на микрофонах по отношению к опорному микрофону (микрофон № 20), совпадает, т. е. не зависят от спектрального состава звукового поля. Это означает пропорциональность комплексных значений звукового давления на микрофонах (это исходные данные для извлечения импеданса) при различных типах сигналов, что приводит к одинаковым значениям импеданса при применении любой процедуры извлечения импеданса.



а

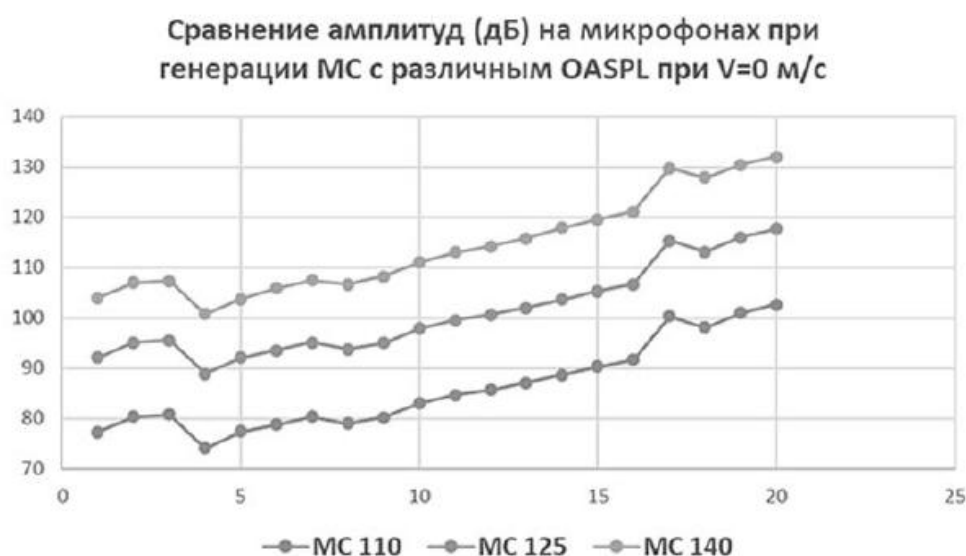


б

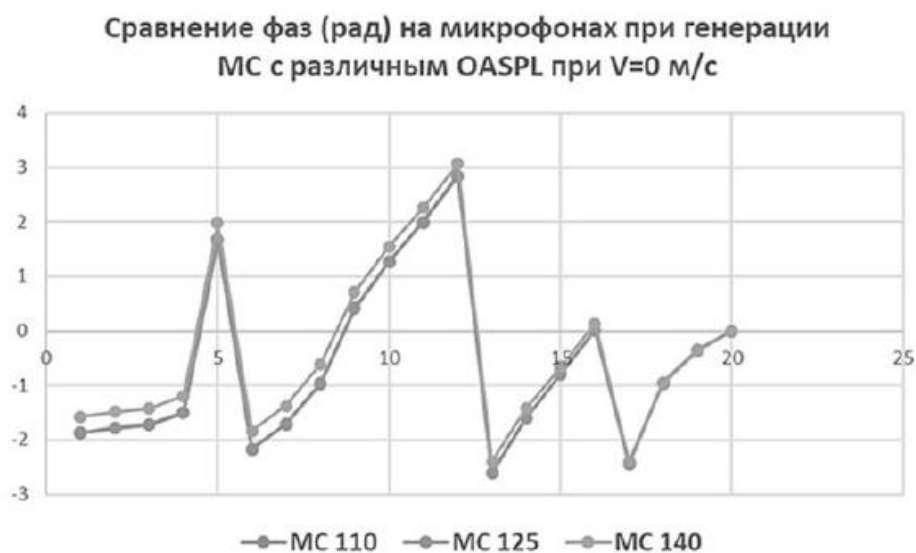
Рис. 4. Сравнение результатов измерений на микрофонах № 1-№20 на частоте 1120 Гц при генерации различных спектральных составов звукового поля с одинаковым OASPL = 144 дБ на режиме $V_{\max} = 70$ м/с:

а — амплитуды; б — фазы

Для установления зависимости извлекаемого импеданса ЗПК от уровня звукового давления, генерируемого при испытаниях на установке «ИсП», были использованы ЗПК и в канале «ИсП» генерировался спектральный состав звукового поля типа мультисинус (МС) с различным OASPL = 110, 125 и 140 дБ на режиме $V_{\max} = 0$ м/с, т. е. при отсутствии потока в канале. На рис. 5, а, б результаты сравнения уровней звукового давления и фазы, измеренных на микрофонах № 1–20 установки «ИсП» на частоте 1120 Гц.



а



б

Рис. 5. Сравнение результатов измерений на микрофонах №1-№20 на частоте 1120 Гц при генерации различных спектральных составов звукового поля с одинаковым OASPL = 144 дБ на режиме $V_{\max} = 70$ м/с:

а — амплитуды; б — фазы

Рис. 5 показывает, что распределение амплитуд по микрофонам «ИсП» близко к эквидистантному при различных OASPL, а распределение фаз 1 по микрофонам практически совпадает для OASPL = 110 дБ и OASPL = 125 дБ, и немного отличается для OASPL = 140 дБ. На рис. 6 представлены результаты извлечения импеданса ЗПК с помощью метода ЦАГИ. Рис. 6, а, б показывают, что комплексные значения импеданса практически совпадают для OASPL = 110 дБ и OASPL = 125 дБ, и немного отличаются для OASPL = 140 дБ. При этом в последнем случае (OASPL = 140 дБ) отличаются только реальные части импеданса, а мнимые части импеданса практически не зависят от уровня звукового давления. Представленные данные рис. 5, а, б и рис. 6, а, б показывают, что на установке «ИсП» реализуется слабо нелинейный режим работы ЗПК на частотах близких к частоте резонанса, так как не проявляется существенная зависимость акустических характеристик ЗПК от OASPL, которая обычно демонстрируется при измерениях на установках типа «Интерферометр нормального падения» («Импедансная труба»).

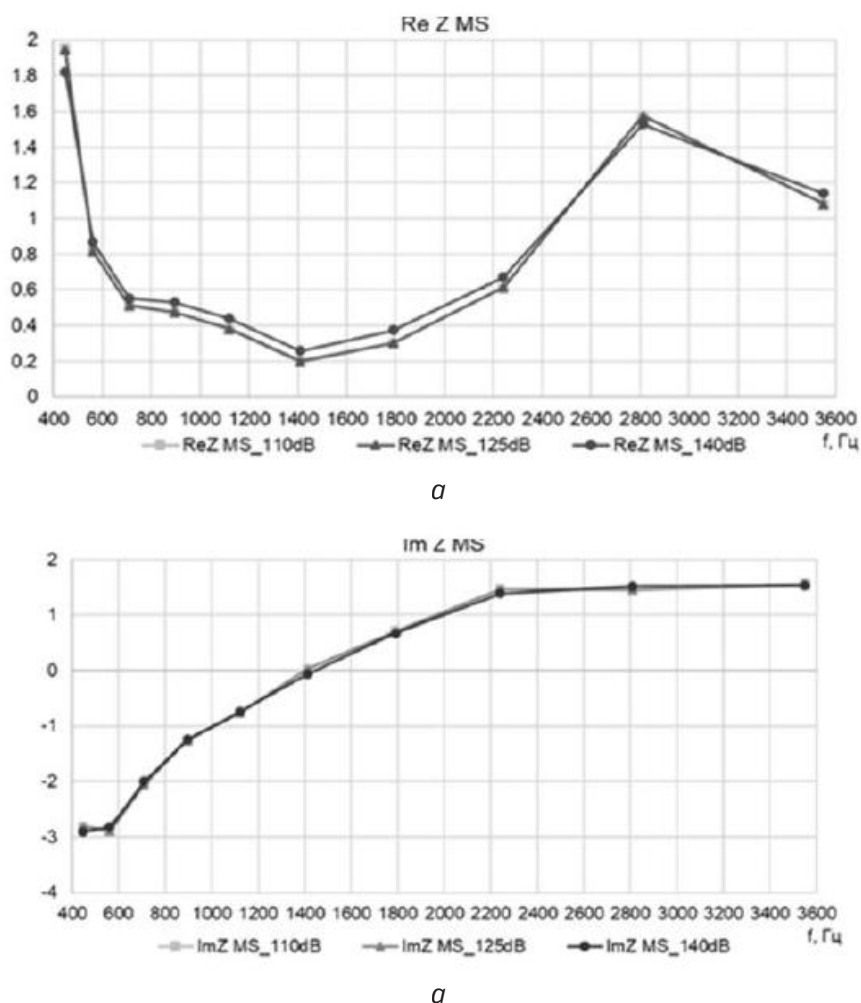


Рис. 6. Комплексные значения импеданса базовых ЗПК, извлеченные с помощью метода ЦАГИ при различных OASPL = 110, 125 и 140 дБ на режиме $V_{\max} = 0$ м/с:

а — реальная часть; б — мнимая часть

Для установления влияния гидродинамических пульсаций давления в ТПС при высоких скоростях потока на результаты измерений на установке «ИсП» была проведена серия испытаний ЗПК, в которых в канале на режиме $V_{\max} = 100$ м/с против потока генерировался спектральный состав звукового поля, состоящий из белого шума с постоянным OASPL = 136 дБ и тона на частоте 1120 Гц с варьируемой амплитудой 140, 125 и 112 дБ. На рис. 7, а–г представлены спектры измеренных сигналов на микрофонах № 20 и № 6 в указанных экспериментах.

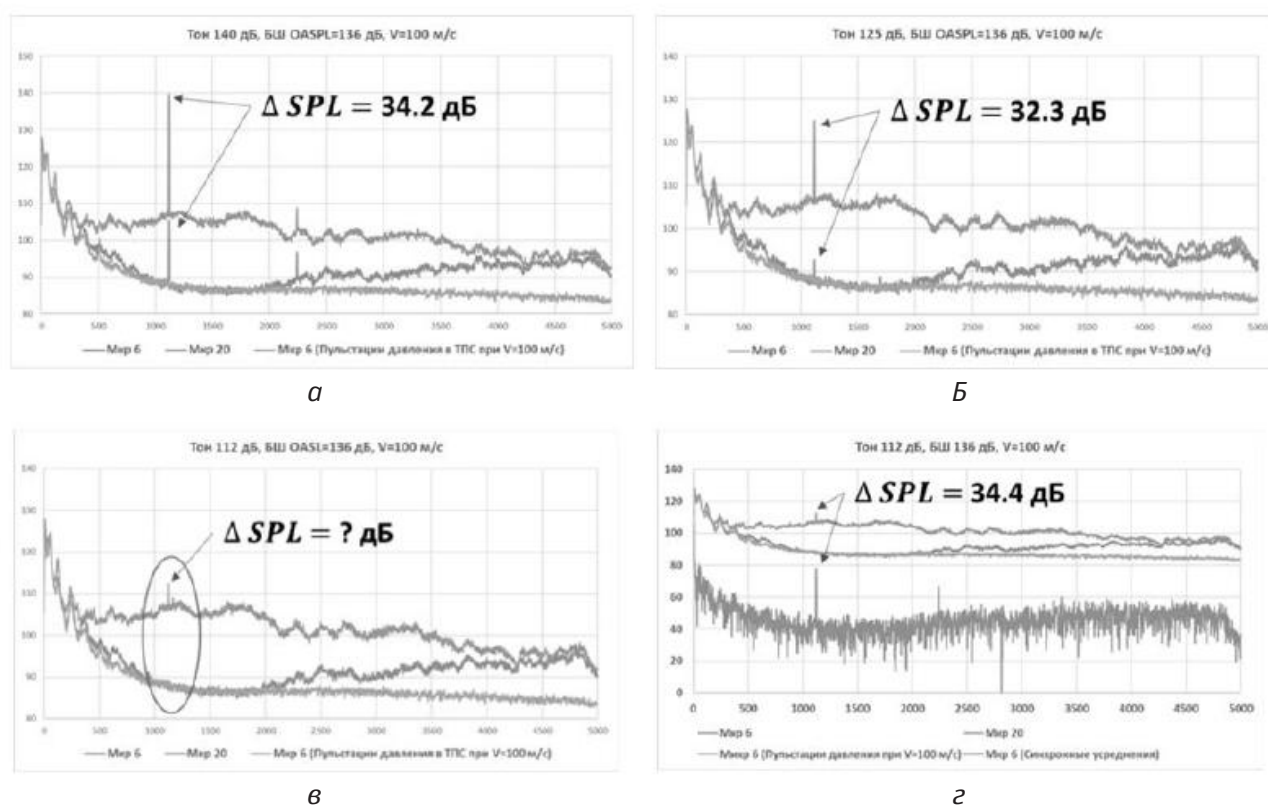


Рис.7. Спектры, измеренные на микрофонах № 20 и № 6 на режиме $V_{\max} = 100$ м/с при совместной генерации белого шума с OASPL = 136 дБ и тона на частоте 1120 Гц с варьируемой амплитудой: а — амплитуда тона 140 дБ; б — амплитуда тона 125 дБ; в — амплитуда тона 112 дБ, стандартная обработка; г — амплитуда тона 112 дБ, синхронное осреднение сигналов на частоте 1120 Гц на микрофоне № 6

Рис. 7, а–г показывают, что во всех указанных трех случаях амплитуда тона превышает на микрофоне № 20 амплитуду белого шума на частоте 1120 Гц. При этом на микрофоне № 6 наблюдается следующая картина. Широкополосный шум «садится» на микрофоне № 6 на гидродинамические пульсации давления в ТПС в окрестности частоты 1120 Гц (рис. 7, а–в), но тональный сигнал при начальных уровнях 140 и 125 дБ на микрофоне № 20 превышает уровень гидродинамических пульсаций давления в ТПС на частоте 1120 Гц и поэтому визуально различим в спектре на микрофоне № 6 (рис. 7, а, б). В этих случаях наблюдается приблизительно одинаковое снижение амплитуды тона на 32...34 дБ (рис. 7, а, б). Однако при начальном

уровне тона 112 дБ он не различим в спектре на микрофоне № 6 (рис. 7, в), т. е. «садится» под фоновые гидродинамические пульсации давления в ТПС. Тем не менее, если для случая начальной амплитуды тона 112 дБ применить метод синхронной обработки сигналов для временной реализации, записанной на микрофоне № 6 (измеренный сигнал синхронизируется с гармоническим сигналом на частоте 1120 Гц), то в результате получится спектр, представленный на рис. 7, г зеленым цветом. Как видно из рис. 7, г, при указанной синхронной обработке все типы широкополосных случайных сигналов усредняются, и их амплитуда резко снижается, а в спектре выделяется только сигнал на частоте 1120 Гц. При таком типе обработки измеренных сигналов диагностируется снижение амплитуды исходно генерируемого тона приблизительно на 34 дБ (см. рис. 7, г), т. е. приблизительно на ту же величину, что реализуется при более интенсивных начальных амплитудах тона (рис. 7, а, б), когда не происходит маскировки полезного сигнала фоновым шумом, в качестве которого выступают гидродинамические пульсации давления в ТПС.

Обсуждение. Таким образом, установлена репрезентативность измерений, приводящихся на установке «ИсП» при генерации высокоинтенсивного широкополосного шума на различных скоростях потока. Значение импеданса ЗПК, извлекаемое на каждой частоте по результатам измерений на «ИсП», не зависит от типа сигнала, генерируемого в канале установки при условии одинаковости OASPL. При маскировке звукового поля на стенках канала «ИсП» фоновыми гидродинамическими пульсациями давления в ТПС импеданс ЗПК остается приблизительно таким же, как и при отсутствии эффекта маскировки, и при этом ЗПК снижают уровень звукового давления в канале установки приблизительно на ту же величину, как и при отсутствии эффекта маскировки.

Заключение. По результатам проведенного исследования на установке Интерферометр с потоком и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы, что на установке «ИсП» ЦАГИ моделируются как уровни звукового давления широкополосного, так и тонального шума, характерные для реалистического спектра шума вентилятора современного двигателя за исключением шума ударных волн.

Импеданс ЗПК, извлекаемый по результатам измерений на «ИсП» на одной и той же частоте, не зависит от типа генерируемых в канале установки сигналов (тон, мультисинус, белый шум и др.) при одинаковом OASPL. Тем самым, извлекаемый импеданс в достаточной мере надежен.

Значения импеданса ЗПК на частоте тональной компоненты шума и на близкой частоте широкополосной компоненты шума практически одинаковы на всех скоростях потока.

Для рассмотренных ЗПК, которые имеют достаточно низкую реальную часть импеданса в диапазоне частот близких к резонансной частоте, на установке «ИсП» реализуется только слабо нелинейный режим их работы из-за сильного затухания звука вдоль оси канала в рабочей части установки.

Список источников

- [1] Ostrikov N., Yakovets M., Denisov S., Ipatov M. Experimental Investigation of Mean Flow Profile Effects on Impedance Eduction for Multi-Segment Liners. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2638>
- [2] Denisov S., Ostrikov N., Yakovets M., Ipatov M. Investigation of Sound Propagation in Rectangular Duct with Transversally Non-Uniform Flow and Anisotropic Wall Impedance by Asymptotic Theory and 3D Finite Element Method. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2640>