

## **Соглашение о предоставлении субсидии № 14.625.21.0038**

Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 -2020 годы»

Проект: «Разработка методов снижения акустического воздействия самолета на среду с учетом азимутальной неоднородности звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в воздухозаборном канале и изменения амплитуды и направленности звуковых вращающихся мод при натекании потока »

Руководитель проекта: Копьев Виктор Феликсович

### **Этап 2. Проведение теоретических и экспериментальных исследований**

#### **Цели и задачи проекта:**

Настоящая ПНИЭР проводится в рамках выполнения Программного мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». В качестве Индустриального партнера проекта выступает АО «ОДК-Авиадвигатель», а соисполнителем проекта является Пермский научно-исследовательский политехнический университет (ПНИПУ).

Целью ПНИЭР в целом является разработка методов повышения эффективности звукопоглощающих конструкций (ЗПК), на основе учета азимутальной неоднородности, присущей реальным конструкциям, устанавливаемым в трактах авиадвигателей, и учета различий, наблюдаемых при излучении звука из воздухозаборника в стендовых и полетных условиях работы авиадвигателя за счет натекающего потока.

Основными научными задачами ПНИЭР в целом являются

- уточнение существующих моделей распространения звука в каналах с потоком на основе учета азимутальной неоднородности ЗПК;
- разработка уточненного метода настройки ЗПК с учетом азимутальной неоднородности ЗПК, обусловленной установленными допусками при их изготовлении или особенностями интегрирования ЗПК в состав двигателя;
- экспериментальное исследование на маломасштабной модели воздухозаборника различий излучения звука из открытого конца воздухозаборника при моделировании стендовых условий и условий полета;
- разработка уточненного метода пересчета результатов акустических испытаний двигателя в статических стендовых условиях на работу двигателя в составе самолета в условиях реального полета с учетом различий излучения звука из открытого конца воздухозаборника для этих двух ситуаций;
- валидация разработанного метода учета азимутальной неоднородности ЗПК с помощью экспериментального исследования влияния азимутальной неоднородности ЗПК на акустическое излучение из модельного крупномасштабного воздухозаборника в заглушенной камере;
- отработка уточненных методов настройки ЗПК с помощью расчетного определения эффективности работы ЗПК.

#### **Ожидаемые результаты проекта:**

1 Разработка аналитической модели влияния азимутальной неоднородности ЗПК на распространение вращающихся мод в цилиндрическом канале применительно к проблеме бесшовных ЗПК.

2 Метод учета азимутальной неоднородности ЗПК при настройке ЗПК.

3 Метод пересчета результатов акустических испытаний авиадвигателя в статических стендовых условиях на работу двигателя в составе самолета в условиях реального полета с учетом различий излучения звука из открытого конца воздухозаборника авиадвигателя для этих

двух ситуаций.

4 Расчетные оценки эффективности работы ЗПК при их настройке с помощью уточненных методов

### **Перспективы практического использования:**

Полученные в результате исследований уточненные методы настройки ЗПК позволят разрабатывать более эффективные ЗПК для отечественных авиадвигателей, что, с одной стороны, обеспечит конкурентоспособность отечественных магистральных самолетов по акустическим характеристикам, а с другой стороны, приведет к снижению шума самолетов на местности, и, тем самым, улучшит качество жизни людей, проживающих в районе аэропортов.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 29.09.2016 г. № 14.625.21.0038 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» на этапе № 2 в период с 01.01.2017 по 29.12.2017 выполнялись следующие работы:

1) Разработка аналитической модели влияния азимутальной неоднородности ЗПК на распространение вращающихся мод в цилиндрическом канале применительно к проблеме бесшовных ЗПК.

2) Проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях по извлечению и управлению радиальной структурой звукового поля в канале маломасштабной модели воздухозаборника.

3) Проведение экспериментальных исследований в заглушенной камере по управлению диаграммой направленности излучения в дальнем поле с помощью управления азимутальной и радиальной структурой звукового поля в канале модели воздухозаборника при отсутствии потока.

4) Проведение испытаний маломасштабной модели воздухозаборника в заглушенной камере при наличии потока для определения различия амплитуд и диаграмм направленности излучения звука из открытого конца воздухозаборника при моделировании стендовых условий и условий полета.

5) Разработка конструкции крупномасштабных ЗПК для моделирования влияния азимутальной неоднородности ЗПК.

6) Разработка технологии изготовления конструкции крупномасштабных ЗПК из полимерных композиционных материалов.

7) Изготовление конструкции крупномасштабных ЗПК.

8) Проведение испытаний натурного двигателя на открытом стенде с целью определения азимутальной структуры звукового поля, излучаемого из открытого канала воздухозаборника при наличии и отсутствии ЗПК в воздухозаборнике.

В результате исполнения указанного Соглашения на этапе 2 получены следующие основные результаты:

1) На основе сингулярной теории возмущений, основанной на методе секулярных уравнений развивающихся в слое смещения слабо неосесимметричных струй, разработана аналитическая модель влияния азимутальной неоднородности ЗПК на распространение вращающихся мод в цилиндрическом канале применительно к проблеме бесшовных ЗПК в предположении о слабой неоднородности импеданса ЗПК в азимутальном направлении, определяемой малым параметром  $\varepsilon$ . Показано, что появление в свойствах облицовки стенок канала слабой азимутальной асимметрии импеданса приводит к перестройке системы распространяющихся звуковых мод в канале, в результате которой каждая мода, как собственное решение задачи о распространении звука в каналах с потоком, становится смесью азимутальных гармоник (в осесимметричном случае каждое собственное решение является чистой азимутальной гармоникой) со своими индивидуальными амплитудами, но одним радиальным и осевым волновыми числами, связанными между собой дисперсионным уравнением, справедливым для случая осесимметричной облицовки. При этом указанные волновые числа получают некоторые поправки по отношению к случаю осесимметричной облицовки. Выполнен анализ решения характеристического уравнения относительно поправок, которые получают радиальные волновые числа, как собственные значения задачи о распространении мод в канале с потоком, при установке на стенках канала облицовок,

имеющих слабые неоднородности локально реагирующего импеданса в азимутальном направлении применительно к следующим трем типам азимутально неоднородных облицовок стенок канала:

- наличие на однородной облицовке стыков (участки абсолютно твердой поверхности) малой ширины, неравномерно расположенных в азимутальном направлении,
- наличие на однородной облицовке стыков (участки абсолютно твердой поверхности) малой ширины, равномерно расположенных в азимутальном направлении,
- бесшовные ЗПК со случайной неоднородностью импеданса в азимутальном направлении.

Проведенный анализ показал высокую чувствительность характеристик мод, распространяющихся по каналу, к нарушению свойств однородности импеданса облицовки в азимутальном направлении. При этом в случаях, когда управляющие параметры задачи близки к резонансным значениям, даже при слабом нарушении азимутальной симметрии импеданса облицовки имеет место существенное отклонение характеристик распространяющихся мод от своих значений в осесимметричном случае. Тем самым, показано, что учет возможной азимутальной асимметричности свойств облицовки (ЗПК) необходим при настройке параметров ЗПК на максимальное затухание звука в канале.

2) Выполнено дооснащение маломасштабной модели воздухозаборника решеткой, состоящей из 48-ми микрофонов, для извлечения как азимутальной, так и радиальной структуры генерируемого в канале звукового поля, а также в системе генерации звукового поля увеличено число задействованных акустических драйверов с 6-ти до 12-ти. Доработан алгоритм настройки системы генерации звуковых мод в канале модели воздухозаборника, разработанный на этапе 1 настоящей ПНИЭР, для использования при настройке системы генерации всех 48-ми микрофонов решетки и 12-ти динамиков. Кроме этого, были расширены критерии поиска параметров настройки, при которых в канале генерируется звуковое поле, состоящее из одной или двух доминирующих азимутальных мод с превышением SPL над минорными модами на 20 дБ и более. В лабораторных условиях выполнено извлечение радиальной структуры звукового поля с помощью 48-ми микрофонной решетки. На основе полученных данных о радиальной структуре звукового поля в канале сформулирован принцип управления радиальной структурой звукового поля в канале маломасштабной модели воздухозаборника, который допускает система генерации звукового поля.

3) Экспериментально продемонстрирована возможность управления диаграммой направленности излучения в дальнем поле с помощью управления азимутальной и радиальной структурой звукового поля в канале модели воздухозаборника при отсутствии потока. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических диаграмм направленности, которое продемонстрировало удовлетворительное совпадение для случаев, когда в канале сгенерирована единственно доминирующая радиальная мода и ее амплитуда превышает амплитуды минорных мод на 20 дБ и более. Выполнено исследование по определению роли толщины стенок канала на диаграммы направленности излучения на различных частотах. Сравнение диаграмм направленности излучения звука из открытого каналов решетки микрофонов (кромка 6 мм) и модели воздухозаборника (кромка 35 мм), показало, что, чем выше частота генерации звука, тем большее отклонение диаграмм друг от друга наблюдается. При этом взаимное расположение диаграмм направленности друг относительно друга зависит не только от частоты, но и от доминирующей моды, которая генерируется на данной частоте. Работы проводились с использованием уникальной научной установки «Заглушенная камера с потоком АК-2».

4) Обнаружена экспериментально и объяснена теоретически сверхчувствительность к температурному режиму диаграммы направленности звука, излучаемого из канала при одинаковом режиме работы источника звука. Показано, что изменение температуры в помещении заглушенной камеры на 3°C приводит на некоторых частотах генерации звука к расхождению уровней звукового давления под некоторыми углами наблюдения на величину порядка 2 дБ. Сделан практически важный вывод о том, что действующая нормативная база по

пересчету результатов летных испытаний самолетов на стандартные значения температуры и относительной влажности окружающей среды не учитывает указанный эффект. Анализ спектров ближнего и дальнего поля показал, что при испытаниях реализуется эффект «Haustacking», который может быть следствием как отрыва всасывающегося потока вблизи среза канала модели воздухозаборника, так и следствием прохождения звуковых волн, излучаемых из канала воздухозаборника через турбулентный сдвиговый слой струи спутного потока. Испытания показали, что эффект, обнаруженный в работе [40] для одномодовой генерации звука в канале, в целом находит экспериментальное подтверждение. Анализ диаграмм направленности звукового поля показывает их существенную зависимость от выбранного в испытаниях скоростного режима для всасывающего и спутных потоков. При этом под отдельными углами наблюдения может наблюдаться изменение уровня звукового давления на 10 дБ в случае одномодовой генерации звука и на 20 дБ в случае многомодовой генерации звука при изменении скоростного режима для потоков. Обнаружено, что наиболее часто реализуемой ситуацией оказывается такая, при которой амплитуда в максимуме диаграммы направленности излучения в случае отсутствия спутного потока меньше соответствующей амплитуды в случае равенства скоростей спутного и всасывающего потоков на величину порядка 2-4 дБ. Работы проводились с использованием уникальной научной установки «Заглушенная камера с потоком АК-2».

5) Разработана эскизная конструкторская документация, которая соответствует требованиям национальных стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) ГОСТ 2.001-2013.

6) Разработана лабораторная технологическая инструкция № ЦТ224-17ТИ для изготовления образца-макета ЗПК из полимерных композиционных материалов в соответствии с требованиями национальных стандартов Единой системы технологической документации (ЕСТД) ГОСТ 2.001-2013.

7) Изготовлен образец-макет корпуса авиационной двигательной установки, оснащенной накладками для создания азимутально неоднородного импеданса. Разработан технологический акт изготовления образца-макета № ЦТ225-17ТА.

8) Проведены акустические испытания натурального авиационного двигателя 100-05(042) на открытом стенде (ОС-5) с целью определения азимутальной структуры звукового поля, излучаемого из открытого канала воздухозаборника при наличии ЗПК в двигателе и отсутствии ЗПК в воздухозаборнике. С оформлением соответствующего акта приема-передачи Получателю субсидии – ФГУП «ЦАГИ» переданы акт и протоколы испытаний, результаты акустических измерений для проведения дальнейших работ по анализу, отработке и верификации методов.

Цели и задачи ПНИЭР «Разработка методов снижения акустического воздействия самолета на среду с учетом азимутальной неоднородности звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в воздухозаборном канале и изменения амплитуды и направленности звуковых вращающихся мод при натекании потока» (шифр заявки «2016-14-579-0009-467»), поставленные на этапе 2, выполнены в полном объеме, а полученные результаты будут использованы при проведении работ на следующем этапе.