

УДК 534.2

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДАЛЬНОГО СОСТАВА ТОНАЛЬНОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В КАНАЛЕ И ДАЛЬНЕМ ПОЛЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОТОКА

© 2023 г. Н. Н. Остриков^{a, *}, М. А. Яковец^a, И. С. Ипатов^a, И. В. Панкратов^a

^a ФАУ “ЦАГИ”, Акустическое отделение, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

*e-mail: nikolay.ostrikov@tsagi.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Разработан метод определения модального состава коррелированных звуковых мод, распространяющихся в цилиндрическом канале, особенностью которого является учет эффекта отражения звука от открытого конца канала с помощью численного или аналитического расчета коэффициентов отражения. В заглушенной камере АК-2 проведена валидация данного метода, в которой звуковое поле создавалось в канале маломасштабной модели воздухозаборника с помощью 12 динамиков на фиксированных частотах, определение модального состава осуществлялось с помощью 48 микрофонов, установленных заподлицо стенок канала, и проводились синхронные измерения направленности излучения звука из открытого конца канала в дальнем поле. При этом на основе найденных амплитуд звуковых мод в канале проводился расчет характеристик излучения в дальнем поле с использованием аналитического решения по излучению звука из полубесконечного цилиндрического канала, результаты которого сравнивались с результатами измерений. Показано, что амплитуды звуковых мод, найденные согласно разработанному методу, позволяют с высокой точностью восстановить характеристики дальнего звукового поля в тех случаях, когда число сгенерированных распространяющихся мод в канале не превышает количества установленных микрофонов в цилиндрической решетке.

Ключевые слова: модальный анализ звукового поля в каналах, когерентные звуковые моды, цилиндрический канал, коэффициенты отражения звуковых мод от открытого конца канала, излучение звука из открытого конца канала

DOI: 10.31857/S0320791923600099, EDN: IULPLA

ВВЕДЕНИЕ

Знание модального разложения звукового поля, генерируемого вентилятором авиационного двигателя в воздухозаборном канале, позволяет повысить эффективность настройки параметров звукопоглощающих конструкций, устанавливаемых на стенках каналов. С развитием элементной базы в 1990-е годы, стали активно разрабатываться экспериментальные методы определения модального состава звукового поля в каналах с использованием микрофонных решеток, расположенных заподлицо с жесткими стенками канала. К настоящему времени разработаны различные подходы к определению модального состава звукового поля в каналах различной геометрии [1–11]. При этом большинство разработанных методов основаны на предположении, что различные звуковые моды, сгенерированные в каналах, являются некоррелированными между собой, и

поэтому такие методы в той или иной степени базируются на идеологии метода “плоского” бимформинга, позволяющего локализовать и ранжировать некоррелированные источники звука с помощью плоских антенн. Предположение о некоррелированности различных звуковых мод в канале обычно делается исходя из того, что в реальном двигателе одновременно существует множество некоррелированных источников шума на каждой частоте. Однако исследования, проведенные в работе [8], показывают, что это предположение выполняется не полностью.

Непосредственной мотивацией настоящих исследований послужили выводы из углубленного анализа результатов работы [12]. В этой работе на основе испытаний маломасштабной модели воздухозаборника в заглушенной камере АК-2 было экспериментально подтверждено, что независимое изменение скорости всасываемого в воздухо-

заборник потока и скорости набегающего потока при одинаковой генерации звукового поля в канале приводит к существенно различным диаграммам направленности излучения в дальнем поле, что было предсказано в работе [13] на основе численных исследований. При этом звуковое поле в канале маломасштабной модели воздухозаборника создавалось 12 динамиками на различных тональных частотах, причем настройка динамиков с использованием метода, описанного в работе [14], позволяла генерировать различную коррелированную модальную структуру звукового поля на каждой частоте. В частности, удалось экспериментально реализовать звуковое поле, состоящее из небольшого числа звуковых мод, амплитуда которых превышала амплитуды других звуковых мод на 20–25 дБ. Модальный состав звукового поля определялся с использованием решетки из 48 микрофонов, а метод модального анализа был сфокусирован в этой работе на определении звуковых мод с доминирующими амплитудами.

В то же время оказалось, что модальное разложение звукового поля, определяемое с помощью микрофонной решетки в канале, не позволяет рассчитать направленность излучения в дальнем поле даже в простейшем случае отсутствия потока в воздухозаборнике. При этом для таких расчетов было использовано аналитическое решение задачи об излучении звука из полубесконечного цилиндрического канала, полученное с использованием метода Винера–Хопфа [15–17]. Наиболее явно это проявилось в случаях генерации только одной звуковой моды вблизи условия отсечки, амплитуда которой превышала амплитуды других звуковых мод на 15–20 дБ, но измеренная направленность излучения в дальнем поле абсолютно отличалась от соответствующей направленности излучения этой звуковой моды. Анализ причин этих расхождений показал, что разные моды имеют существенно различную эффективность излучения в дальнее поле из-за различного отражения от края канала обратно в канал. В результате в дальнем поле могут доминировать звуковые моды, амплитуда которых в канале на 10–15 дБ меньше амплитуд доминирующих мод.

Этот анализ привел к следующим выводам. Во-первых, эффект отражения звуковых мод от края канала обратно в канал очень важен с точки зрения излучения звука в дальнее поле. Во-вторых, метод модального разложения звукового поля должен позволять точно определять амплитуды *всех* распространяющихся звуковых мод в канале для заданной частоты, особенно если рассматривается генерация коррелированных звуковых мод. В-третьих, валидация метода модальной декомпозиции звукового поля в канале не может быть проведена только по критерию совпадения звукового поля, восстановленного на микрофонах в канале в соответствии с найденными ам-

плитудами звуковых мод, со звуковым полем, измеренным на этих микрофонах. Этот вывод является следствием плохой обусловленности обратной задачи определения коррелированного модального состава звукового поля в канале по результатам измерений на микрофонах решетки, в результате чего реализуется ситуация приблизительного совпадения экспериментальных и восстановленных звуковых давлений на микрофонах в канале для широкого состава амплитуд звуковых мод. Следовательно, способ проверки работоспособности метода модальной декомпозиции должен основываться на возможности правильного прогнозирования направленности дальнего поля по найденным амплитудам звуковых мод. Этот вывод соответствует точке зрения, изложенной в работах [3–6], в которых представлена проверка метода модальной декомпозиции некоррелированных звуковых мод в канале наружного контура двигателя, основанного на возможности прогнозирования направленности дальнего поля.

В настоящей работе была поставлена цель разработки метода декомпозиции звукового поля, сгенерированного в канале на фиксированной частоте, на коррелированные звуковые моды без выделения доминирующих и минорных мод, который мог бы пройти проверку на точность расчета направленности излучения в дальнем поле по найденным амплитудам звуковых мод. Особенностью разработанного метода является то, что эффект отражения звуковых мод от края канала обратно в канал учитывается на основе предварительного численного или аналитического расчета коэффициентов отражения. При этом используется стандартное представление отраженного звукового поля через амплитуды падающих звуковых мод и коэффициенты отражения звуковых мод (например, такое представление используется в работе [18], но в другой постановке задачи). Такое представление звукового поля позволяет почти вдвое сократить количество неизвестных амплитуд звуковых мод, т.е. неизвестны только амплитуды звуковых мод в падающей звуковой волне, а отраженное звуковое поле вычисляется по звуку, падающему на открытый конец канала.

Ниже в работе дано общее описание разработанного метода и приведены результаты его проверки в заглушенной камере АК-2 с использованием того же оборудования, что и в работе [12], но при условии отсутствия потока. Поскольку случай генерации коррелированных звуковых мод очень чувствителен к присутствию посторонних источников звука, например, к звуку, создаваемому вибрациями внешней поверхности модели воздухозаборника, то для повышения точности измерений пришлось провести значительные методические исследования. В отличие от работы [12], в настоящих исследованиях не использовалась специальная настройка динамиков для гене-

рации малого числа доминирующих звуковых мод. Напротив, сдвиг фазы между тональными сигналами, подаваемыми на различные динамики, выбирался случайным образом, чтобы генерировать на каждой частоте относительно полную комбинацию коррелированных звуковых мод в канале. Измерения в дальнем поле и в канале были синхронизированы друг с другом, чтобы последующая обработка измеренных сигналов могла выполняться единообразно на микрофонах, установленных в канале и в дальнем поле, с целью последующего сравнения как амплитудных, так и фазовых характеристик. На основе найденных амплитуд звуковых мод согласно разработанному методу рассчитывались амплитудные и фазовые характеристики звукового поля на микрофонах в дальнем поле с использованием аналитического решения по излучению звука из полубесконечного цилиндрического канала [15–17]. Использование этого аналитического решения оправдано тем, что толщина стенок канала значительно меньше длин волн, генерированных в канале. Далее полученные расчетные значения сравнивались с экспериментальными данными. В результате разработанный метод модальной декомпозиции был успешно апробирован до частоты 6400 Гц ($ka \approx 11.7$, где k – основное волновое число, a – радиус канала). При этом на этой верхней частоте число распространяющихся коррелированных падающих звуковых мод в канале составляло 46 при использовании 48 микрофонов в решетке. Таким образом, метод декомпозиции коррелированных мод оказался валидированным для случая, когда количество распространяющихся падающих мод в канале не превышает количество микрофонов.

1. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ

В настоящей работе разработан метод для экспериментального определения с помощью решетки микрофонов различных звуковых мод в цилиндрических каналах с потоком в предположении об их коррелированности. Данный метод разработан применительно к стендовым акустическим испытаниям двигателя, когда используется лемнискатный воздухозаборник с жесткими стенками, в который всасывается неоднородный поток (рис. 1). При этом микрофоны решетки устанавливаются в той части канала вдали от среза, где с высокой степенью точности реализуется однородный поток, но вблизи жестких границ имеется пограничный слой относительно малой толщины по сравнению с радиусом канала.

Под звуковыми модами подразумеваются собственные решения линейной задачи о распространении звука в канале. При наличии осевой

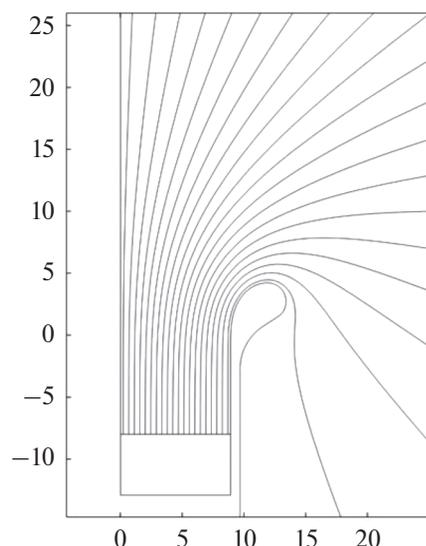


Рис. 1. Схематичное изображение потока, всасываемого в лемнискатный воздухозаборник.

симметрии канала и потока для фиксированной частоты звука ω звуковые моды образуют двухпараметрическое семейство вида $p_{mn}^{\pm}(r, x)e^{im\varphi - i\omega t}$, описываемое азимутальным m и радиальным n числами, где верхний индекс “+” соответствует волнам, распространяющимся по потоку, а индекс “-” – против потока (пусть ось x направлена против потока в направлении среза воздухозаборника). Если рассматривается часть канала, в которой поток с высокой степенью точности является плоскопараллельным с произвольным профилем скорости, то собственное решение имеет вид

$$p_{mn}^{\pm}(r, x) = p_{mn}^{\pm}(r)e^{i\alpha_{mn}^{\pm}x}, \quad (1)$$

где α_{mn}^{\pm} – осевое волновое число звуковой моды при распространении по и против потока соответственно.

Основная трудность определения модального состава звукового поля, состоящего из коррелированных мод, состоит в том, что каждая звуковая мода, падающая из внутренней части канала на его срез, отражается обратно внутрь канала, в результате чего звуковое поле $p(r, x, \varphi)$ в зоне расположения решетки микрофонов оказывается суперпозицией неизвестного звукового поля, сгенерированного вентилятором, и неизвестного отраженного звукового поля, причем эти два поля коррелированы между собой:

$$p(r, x, \varphi) = \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=0}^{N_0(m)} A_{mn} p_{mn}^{-}(r, x) e^{im\varphi} + \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{l=0}^{L_0(m)} B_{ml} p_{ml}^{+}(r, x) e^{im\varphi}, \quad (2)$$

где A_{mn} – амплитуды звуковых мод, сгенерированных вентилятором, B_{ml} – амплитуды звуковых мод, отраженных от открытого среза канала. В представлении (2) учитывается только конечное число распространяющихся мод, хотя, если решетка микрофонов расположена близко от вентилятора или среза канала, то могут быть учтены и не распространяющиеся моды. В результате описанной особенности число неизвестных амплитуд A_{mn} и B_{ml} оказывается достаточно большим в диапазоне частот до 5 кГц (для натурального двигателя это число исчисляется несколькими сотнями), что при ограниченном числе микрофонов в решетке делает задачу распознавания модальной состава плохо обусловленной.

В разработанном методе предполагается расчетное определение амплитуд отраженных звуковых мод с целью практически двукратного уменьшения числа неизвестных. Действительно, если в направлении среза канала распространяется одна звуковая мода $A_{mn}p_{mn}^-(r, x)e^{im\varphi}$, то при отражении от среза она сохранит свое азимутальное число в силу азимутальной однородности канала и потока, а отраженное звуковое поле будет состоять из суперпозиции звуковых мод со всевозможными радиальными числами. Поскольку задача является линейной, то отраженное поле в этом случае будет иметь вид $\sum_{l=0}^{L_0(m)} R_{n \rightarrow l}^m A_{mn} p_{ml}^+(r, x)e^{im\varphi}$, где $R_{n \rightarrow l}^m$ – комплексный коэффициент отражения падающей звуковой моды с радиальным номером n в отраженную звуковую моду с радиальным номером l . Коэффициенты отражения $R_{n \rightarrow l}^m$ могут быть определены с помощью численных методов заранее до проведения измерений для каждого режима работы двигателя или с помощью аналитического решения, если рассматривается модельная ситуация, близкая к полубесконечному цилиндрическому каналу. В результате представление звукового поля (2) приобретает следующий вид

$$p(r, x, \varphi) = \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=0}^{N_0(m)} A_{mn} \left(p_{mn}^-(r, x) + \sum_{l=0}^{L_0(m)} R_{n \rightarrow l}^m p_{ml}^+(r, x) \right) e^{im\varphi} \equiv (3) \\ \equiv \sum_{m=-M_0}^{M_0} C_m(r, x) e^{im\varphi}.$$

Первая форма записи разложения (3) является полноценным разложением звукового поля на звуковые моды, а вторая форма записи – разложением на азимутальные моды, каждая из которых определяется амплитудой

$$C_m(r, x) = \sum_{n=0}^{N_0(m)} A_{mn} \left(p_{mn}^-(r, x) + \sum_{l=0}^{L_0(m)} R_{n \rightarrow l}^m p_{ml}^+(r, x) \right). (4)$$

Пусть теперь заодно радиус стенок канала радиуса a установлено S микрофонов с координатами (x_j, φ_j) , где $j = 1, \dots, S$. Можно считать толщину пограничного слоя приближенно постоянной, что позволяет рассматривать поток в этой зоне в качестве плоскопараллельного. В этом случае в разложениях (2), (3) и (4) можно использовать представление полей $p_{mn}^\pm(r, x)$ в виде (1), в котором осевые волновые числа α_{mn}^\pm определяются из решения уравнения Придмора–Брауна о распространении звука в каналах с плоскопараллельным потоком. Если толщина пограничного слоя мала относительно радиуса канала, то решение данного уравнения в случае жестких стенок канала может быть найдено приближенно для любых дозвуковых скоростей потока с помощью асимптотического метода, развитого в работе [19].

Кроме этого, будем считать, что нормировка собственных решений уравнения Придмора–Брауна выбрана таким образом, что $p_{mn}^\pm(a) = 1$ в (1), т.е. амплитуда звукового поля на стенках канала полностью определяется соответствующими амплитудными коэффициентами A_{mn} и B_{ml} .

Для того чтобы решетка микрофонов позволяла распознавать звуковые моды с различными азимутальными и радиальными числами, необходимо, чтобы ее микрофоны были распределены по поверхности стенки как в азимутальном, так и радиальном направлениях. Рассмотрим случаи, когда в конфигурации решетки присутствует хотя бы одна круговая подрешетка, микрофоны которой имеют одинаковую осевую координату x_c и различаются азимутальными углами установки.

Пусть S_c – число микрофонов в круговой подрешетке, которая содержит наибольшее число микрофонов среди остальных круговых подрешеток. Номера микрофонов в этой подрешетке обозначим как $j \in Su_l$. Тогда наибольшее азимутальное число M_0 , которое могут иметь распространяющиеся по каналу звуковые моды без затухания, азимутальные амплитуды которых $C_m(a, x_c)$ могут быть определены с максимальной степенью точности, равно $M_0 = [(S_c - 1)/2]$, где квадратные скобки обозначают целую часть числа.

Предположим, что в канале с потоком генерируется детерминированное звуковое поле на фиксированной частоте, которое измеряется с помощью микрофонов решетки. Вычисляя при обработке результатов измерений автокорреляционные и взаимные корреляционные функции по отношению к некоторому опорному микрофону, каждому микрофону можно сопоставить комплексное значение звукового давления $p_j^{(ex)}$.

Если азимутальное число распространяющихся по каналу звуковых мод на выбранной частоте не превышает $M_0 = [(S_c - 1)/2]$, то азимутальные амплитуды распространяющихся звуковых мод $C_m(a, x_c)$ ($-M_0 \leq m \leq M_0$) могут быть определены или с помощью стандартных формул разложения в ряд Фурье при равномерном расположении микрофонов в круговой подрешетке, или в противном случае с помощью решения задачи минимизации функционала

$$\sum_{j \in CyI} \left| p_j^{(ex)} - \sum_{m=-M_0}^{M_0} C_m(a, x_c) e^{im\varphi_j} \right|^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Заметим, что способ (5) всегда более предпочтителен, поскольку речь идет об обработке экспериментов, в которых могут иметь место систематические ошибки, вызванные, например, вибрациями стенок канала или приходом внутрь канала звука, отраженного от стенок помещения, в котором расположен канал.

После определения азимутальных амплитуд $C_m(a, x_c)$ может быть составлена следующая недоопределенная система уравнений

$$\sum_{n=0}^{N_0(m)} A_{mn} \left(e^{i\alpha_{mn}^- x_c} + \sum_{l=0}^{L_0(m)} R_{n \rightarrow l}^m e^{i\alpha_{mn}^+ x_c} \right) = C_m(a, x_c), \quad (6)$$

$$-M_0 \leq m \leq M_0.$$

Далее, согласно разработанному методу задача определения неизвестных амплитуд A_{mn} звуковых мод должна решаться с помощью нахождения условного минимума функционала

$$\sum_j \left| p_j^{(ex)} - p(a, x_j, \varphi_j) \right|^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где в качестве условий выступают соотношения (6),

$$p(a, x_j, \varphi_j) = \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=0}^{N_0(m)} A_{mn} \left(e^{i\alpha_{mn}^- x_j} + \sum_{l=0}^{L_0(m)} R_{n \rightarrow l}^m e^{i\alpha_{mn}^+ x_j} \right) e^{im\varphi_j}. \quad (8)$$

Если на данной частоте общее число распространяющихся звуковых мод в направлении среза канала равно N_{mod} , т.е. это число неизвестных амплитуд A_{mn} , M_0 — максимальное азимутальное число среди распространяющихся мод, а число микрофонов в решетке подчиняется условиям $S \geq N_{\text{mod}}$, $M_0 \leq [(S_c - 1)/2]$, то задача (6)–(7) является хорошо обусловленной. Данные условия позволяют определять верхнюю границу рабочих частот решетки микрофонов при заданном числе микрофонов, или определять необходимое число микрофонов в решетке по заданной верхней границе рабочих частот.

Таким образом, разработанный метод для случая коррелированных звуковых мод позволяет уменьшить общее число микрофонов решетки, так как практически вдвое снижает число неизвестных амплитудных коэффициентов. Данное преимущество достигается за счет увеличения трудоемкости обработки результатов измерений, возникающего из-за необходимости выполнения предварительных расчетов коэффициентов отражения $R_{n \rightarrow l}^m$. Эти коэффициенты отражения могут быть рассчитаны численно или получены из аналитического решения в случаях простой геометрии канала.

Заметим, что вычисление коэффициентов отражения наиболее робастно при использовании именно аналитического решения. В случае же использования численных решений удобно поступать другим эквивалентным способом: необходимо в канале “запустить” каждую распространяющуюся звуковую моду с единичной амплитудой в качестве волны, падающей на открытый конец канала, и для нее определить звуковое поле $p_{mn}^{(A=1)}(r, x)$:

$$p_{mn}^{(A=1)}(r, x, \varphi) = \left(p_{mn}^-(r, x) + \sum_{l=0}^{\infty} R_{n \rightarrow l}^m p_{ml}^+(r, x) \right) e^{im\varphi}, \quad (9)$$

состоящее из суперпозиции поля падающей моды и поля отраженной волны. Именно это звуковое поле входит во все выражения (3)–(8). Тем самым, при использовании численных методов нет необходимости непосредственного расчета коэффициентов отражения $R_{n \rightarrow l}^m$, а достаточно сразу определить поле $p_{mn}^{(A=1)}(r, x)$ (9), чтобы найти модальный состав из минимизации функционала (7).

В настоящей работе метод используется для случая цилиндрического канала при отсутствии потока. В этом случае давление $p_{mn}^{\pm}(r)$ в выражении (1) выражается через функцию Бесселя

$$p_{mn}^{\pm}(r) = \frac{J_m(\mu_{mn} r)}{J_m(\mu_{mn} a)}, \quad (10)$$

где радиальные волновые числа μ_{mn} являются корнями уравнения

$$J_m'(\mu_{mn} a) = 0. \quad (11)$$

При этом осевые волновые числа звуковой моды α_{mn}^{\pm} выражаются через радиальные волновые числа с помощью дисперсионного уравнения

$$\alpha_{mn}^{\pm} = \pm \sqrt{k^2 - \mu_{mn}^2}. \quad (12)$$

Коэффициенты отражения $R_{n \rightarrow l}^m$ получены в настоящей работе из аналитического решения для полубесконечного цилиндрического канала с жесткими стенками [17]. Аналитическое решение

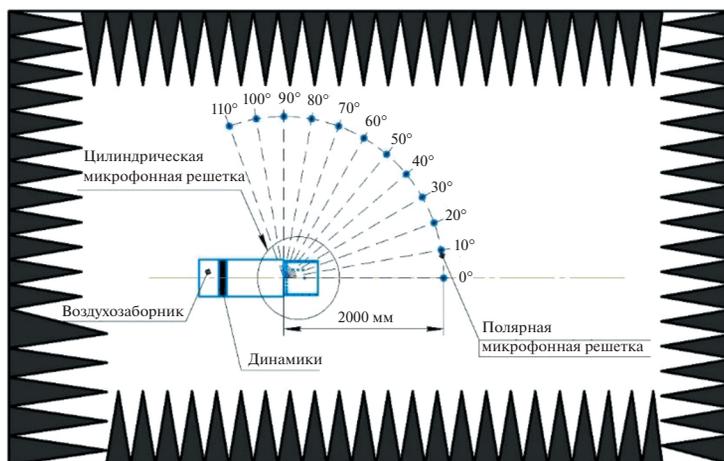


Рис. 2. Схема проведения эксперимента в заглушенной камере АК-2.

этого же типа используется для определения направленности излучения каждой звуковой моды в дальнем поле.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема проведения экспериментов по валидации разработанного метода в заглушенной камере АК-2 представлена на рис. 2.

Основной частью собранного экспериментального стенда является маломасштабная модель воздухозаборника (рис. 3а, 3б) с внутренним диаметром канала 20 см, содержащая генератор звука, состоящий из 12 акустических динамиков, равномерно установленных заподлицо стенок канала в азимутальном направлении (на 3D-модели воздухозаборника кольцо с динамиками обозначено красным цветом). Revamp1680 использовался в качестве усилителя сигналов от динамиков, а в качестве генератора сигналов на динамики использовался модуль NI PXIe-6738, входящий в состав измерительной системы на базе шасси NI PXIe-1071.

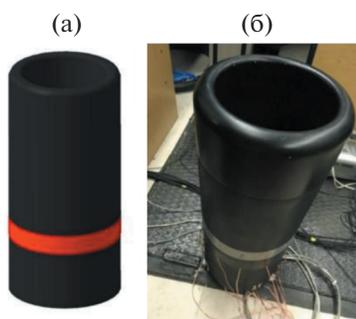


Рис. 3. (а) – 3D модель воздухозаборника, (б) – фото.

Для определения модального состава звукового поля в канале модели воздухозаборника использовалась цилиндрическая 48-микрофонная решетка, трехмерная (3D) модель которой показана на рис. 4а. В таблице на рис. 4б приведены координаты посадочных мест для микрофонов в цилиндрической системе координат (r, q, Z) , где $r = 100$ мм. Решетка, оснащенная 48-ю $\frac{1}{4}$ '' микрофонами V&K, в сборе с моделью воздухозаборника показана на рис. 5а. При этом для точного позиционирования цилиндрической решетки по оси канала, устранения стыков между каналами решетки и воздухозаборника был изготовлен переходник, полностью повторяющий геометрию носка модели воздухозаборника. На рис. 5б показана 3D-модель адаптера для цилиндрической решетки, состоящая из 2 кольцевых частей.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особое внимание было уделено устранению паразитных источников шума, оказывающих влияние на измерения в дальнем поле. В данном случае полезным сигналом является звук, излучаемый из открытого конца модели воздухозаборника, а паразитными источниками являются стенки и нижняя часть модели воздухозаборника, через которые проходит звук, генерируемый динамиками. С этой целью был поставлен методический эксперимент, в котором проведены два типа измерений в дальнем поле с использованием 12 микрофонов с полярной микрофонной решеткой с открытым и закрытым концом воздухозаборника. Открытый конец канала закрывался жесткой стенкой, изготовленной из толстого листа дерева, на поверхность которого был наклеен вибропоглощающий материал. На рис. 6а показана фотография сборки модели воздухозаборника

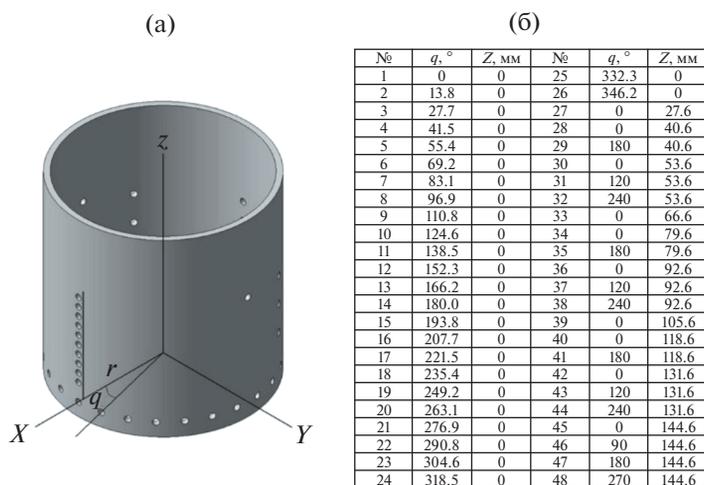


Рис. 4. (а) – 3D модель цилиндрической 48-микрофонной решетки, (б) – координаты посадочных мест для микрофонов в цилиндрической системе координат.

с открытым каналом, а на рис. 6б – с закрытым. Кроме этого, для минимизации паразитного излучения были использованы звукопоглощающие и вибропоглощающие материалы, которые покрывали боковые стенки воздухозаборника.

В табл. 1 показана разница в уровнях звукового давления на 12 микрофонах дальнего поля между конфигурациями с закрытым и открытым концом канала при разных частотах генерации звука. Указанные мероприятия привели к снижению интенсивности звука в среднем на 10–20 дБ. Однако на некоторых частотах и при некоторых углах обзора закрытие канала приводило к небольшому уменьшению амплитуды звукового поля (4–6 дБ), а в некоторых случаях даже к увеличению интенсивности излучаемого звука.

По результатам измерений был сделан вывод о недостаточности звукоизоляции боковых стенок модели и необходимости ее усиления за счет использования, так называемого, закона массы. В итоге было реализован следующий способ звукоизоляции боковых стенок: модель воздухозаборника была помещена внутрь железной трубы, диаметр которой на 30 мм больше наружного диаметра модели, затем кольцевой канал, образованный между наружной боковой поверхностью модели воздухозаборника и внутренней боковой поверхностью железной трубы, был заполнен песком (рис. 7).

В табл. 2 показана разница в уровнях звукового давления на 12 микрофонах между конфигурациями с закрытым и открытым концом канала при разных частотах генерации звука после улучшения звукоизоляции боковых стенок. Закрытие канала в модифицированном варианте привело к снижению интенсивности звука более чем на

20 дБ на всех микрофонах дальнего поля, а в среднем более чем на 30 дБ. Полученный результат был признан удовлетворительным для проведения валидационного эксперимента.

Следующее методическое исследование было проведено с целью выбора основных параметров разработанного метода. Фактически, представленный выше метод модальной декомпозиции содержит на каждой частоте только два параметра: число радиальных мод $N_0(m)$, которые необходимо учитывать в расчете падающего звука с заданным азимутальным номером, и число радиальных мод $L_0(m)$, которые необходимо учитывать в расчете отраженного звука с заданным азимутальным номером. Поскольку расстояние от динамиков до начала микрофонной решетки в модели воздухозаборника составляет 443.8 мм, то можно с уверенностью учитывать только распространяющиеся моды на каждой рассматриваемой частоте, т.е. число $N_0(m)$ совпадает с числом рас-

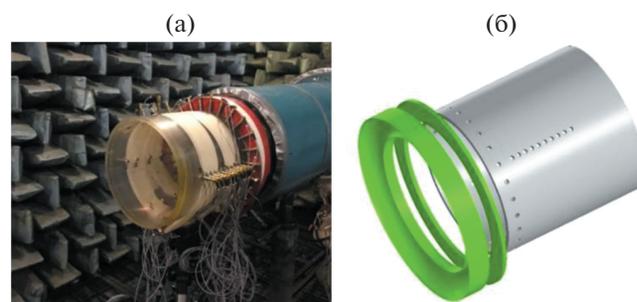


Рис. 5. (а) – 48-микрофонная решетка в сборе с моделью воздухозаборника, (б) – 3D модель адаптера для цилиндрической решетки, состоящая из 2 кольцевых частей.

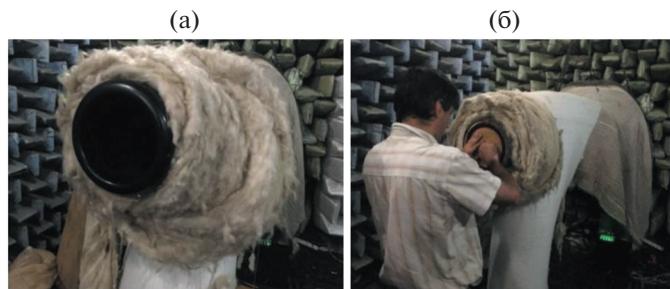


Рис. 6. Фотографии модели воздухозаборника с использованием звукопоглощающих и вибропоглощающих материалов на боковых стенках воздуховода: (а) – с открытым концом канала, (б) – с закрытым концом канала жесткой стенкой из вибропоглощающего материала.

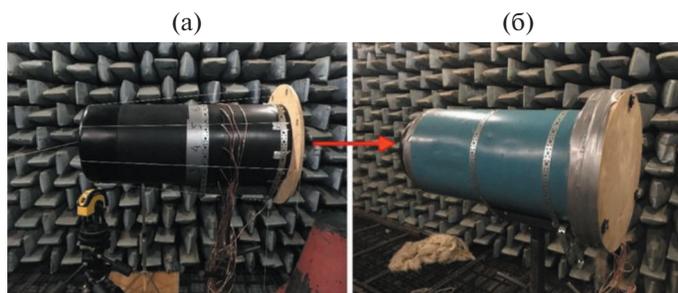


Рис. 7. Модификация модели воздухозаборника с целью улучшения звукоизоляции боковых стенок.

Таблица 1. Разница в уровнях звукового давления на 12 микрофонах дальнего поля между конфигурациями с закрытым и открытым концом канала при разных частотах генерации звука

Дельты уровня звукового давления на полярной решетке микрофонов, дБ												f, Гц
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12	
12.6	13.0	13.9	10.4	6.2	5.7	6.1	4.3	3.3	10.1	16.3	8.9	1248
22.8	24.5	28.9	32.2	20.5	22.3	18.3	9.8	0.4	2.4	3.5	-3.4	1600
20.0	24.2	23.3	20.3	17.3	24.8	11.6	17.3	20.4	7.5	0.2	17.5	2000
17.2	29.4	20.0	31.3	16.4	26.6	15.6	7.4	6.8	6.9	5.4	2.4	2496
20.9	29.1	36.4	24.3	21.3	5.4	13.4	4.2	-6.3	22.1	18.6	13.8	3152
22.3	33.5	33.0	35.9	39.7	26.6	27.1	19.6	11.9	6.9	12.5	7.2	4000
21.3	23.5	29.4	-1.0	6.7	15.3	19.6	19.5	39.9	9.3	15.1	13.4	5000
14.6	15.7	45.6	26.5	31.1	24.3	-1.3	10.3	1.1	10.6	7.4	12.7	6296

Таблица 2. Разница в уровнях звукового давления на 12 микрофонах между конфигурациями с закрытым и открытым концом канала при разных частотах генерации звука после улучшения звукоизоляции боковых стенок

Дельты уровня звукового давления на полярной решетке микрофонов, дБ												f, Гц
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12	
35.1	38.3	37.6	34.7	28.6	26.4	25.4	20.9	21.5	25.7	21.8	2.8	1248
48.6	47.8	41.8	43.1	37.3	32.7	26.1	26.9	26.2	15.8	28.4	28.1	1600
44.2	40.2	42.2	51.3	31.7	31.3	28.8	22.6	25.8	22.1	15.9	20.9	2000
39.1	41.4	21.9	47.6	36.6	38.5	41.1	40.1	52.1	37.4	35.3	40.8	2496
61.3	42.0	44.0	47.0	52.3	55.8	61.4	60.5	57.6	37.7	57.8	43.4	3152
53.4	58.1	55.1	47.7	50.5	47.5	59.5	44.3	37.8	27.7	47.7	30.5	4000
41.4	49.6	48.2	45.6	45.4	39.4	36.2	45.2	37.6	32.6	23.6	28.6	5000
50.5	55.0	52.9	42.1	45.6	50.5	43.4	40.6	37.6	34.4	36.7	38.5	6296

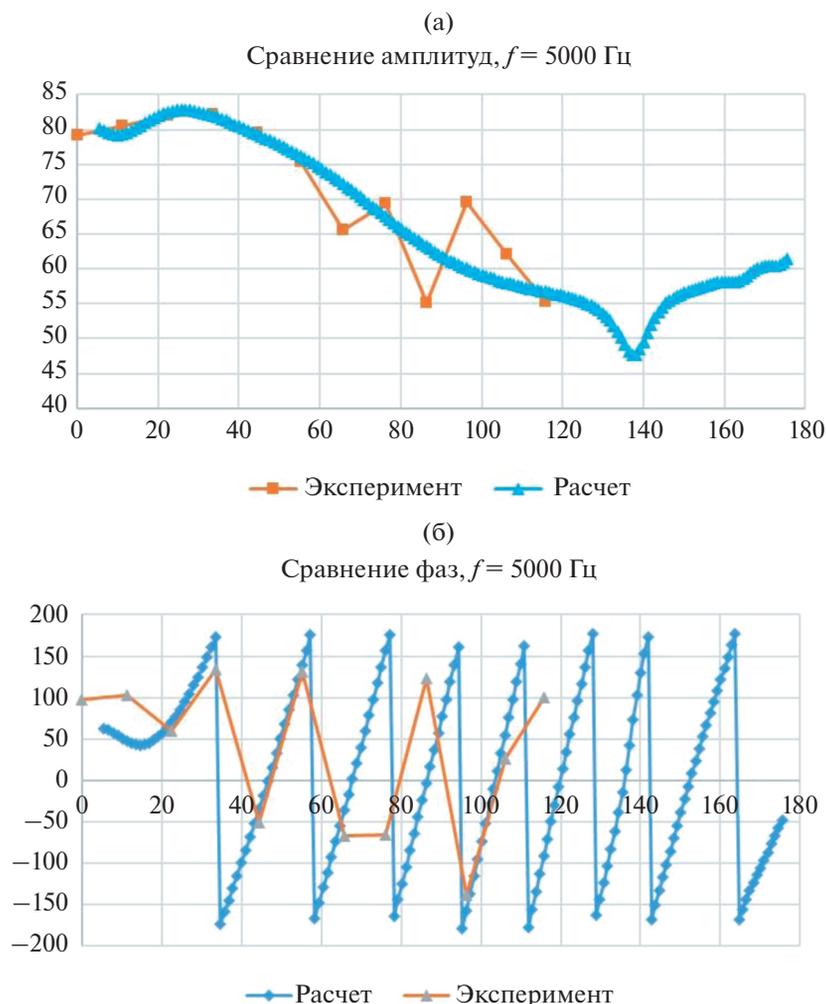


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчетных амплитуд давления и фаз в дальнем поле для частоты $f = 5000$ Гц: (а) — амплитуды, (б) — фазы.

пространяющихся мод при заданном азимутальном числе. Напротив, расстояние от ближайшего микрофона до открытого конца канала составляет всего 54.2 мм, и поэтому вопрос о необходимости учета нераспространяющихся мод в отраженном звуке требует ответа. В работе эта проблема была решена следующим методом.

В канале полностью собранной установки генерировалось звуковое поле на частоте 2000 Гц при произвольном включении всех динамиков. На этой частоте распространяется всего пять звуковых мод с азимутальными числами $-2 \leq m \leq 2$ и радиальным числом $n = 0$. Это означает, что амплитуды A_{m0} всех этих звуковых мод могут быть однозначно определены из соотношения (6) только на основе измерений на микрофонах круговой подрешетки, содержащей 26 микрофонов, которые позволяют однозначно находить амплитуды $C_m(a, x_c)$ азимутальных мод. Безусловно, при

этом используются коэффициенты отражения $R_{0 \rightarrow l}^m$, входящие в соотношение (6), а предельное радиальное число $L_0(m)$ варьируется. Далее, после определения всех амплитуд A_{m0} , с помощью соотношения (8) вычислялись комплексные значения звукового давления на остальных микрофонах решетки, не входящих в круговую подрешетку, которые сравнивались с экспериментальными значениями. При этом особое внимание уделялось четырем микрофонам, которые наиболее близко располагаются к открытому концу канала. Результаты сравнения восстановленного и экспериментального звуковых давлений на этих микрофонах оказались отличными, если среди отраженных мод учитывались нераспространяющиеся звуковые моды, которые затухают на расстоянии 54.2 мм менее чем на 40 дБ. Заметим, что, если не учитывались отраженные звуковые моды, которые затухают на этом расстоянии более чем на

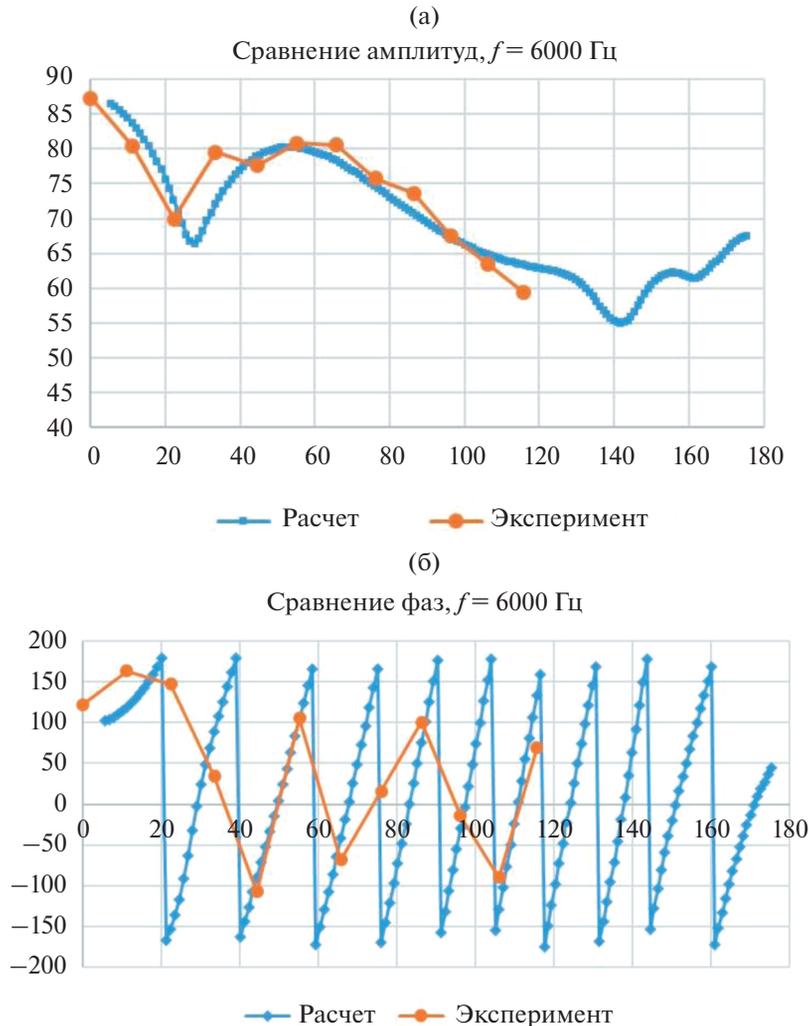


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных амплитуд давления и фаз в дальнем поле для частоты $f = 6000$ Гц: (а) – амплитуды, (б) – фазы.

30 дБ, то восстанавливаемое звуковое давление уже заметно отклонялось от экспериментальных значений на этих четырех микрофонах. Таким образом, в алгоритм, реализующий разработанный метод модального анализа, был заложен критерий: в отраженном поле учитываются все нераспространяющиеся звуковые моды, затухающие на расстоянии 54.2 мм менее чем на 40 дБ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

На рис. 8–10 выборочно представлены результаты сравнения амплитудных и фазовых характеристик звукового давления, измеренных экспериментально на микрофонах в дальнем поле и полученных путем расчета на основе экспериментально определенных комплексных амплитуд звуковых мод, распространяющихся в канале в направле-

нии его края. Обратим внимание, что поскольку рассматривается случай коррелированных звуковых мод, то для получения расчетного значения звукового давления на микрофонах в дальнем поле необходимо сложить все комплексные давления отдельных звуковых мод.

Как видно из рис. 8–10, рассчитанные характеристики звукового давления в дальнем поле качественно соответствуют экспериментальным данным для всех частот и в целом имеют довольно близкие значения, хотя при некоторых углах наблюдается отклонение амплитуд порядка 10 дБ, а в фазовых значениях на несколько десятков градусов. Возникает естественный вопрос: в какой степени результаты этого сравнения можно охарактеризовать как хорошие.

Чтобы ответить на этот вопрос, построим в комплексной плоскости диаграммы звукового давления последовательного суммирования вы-

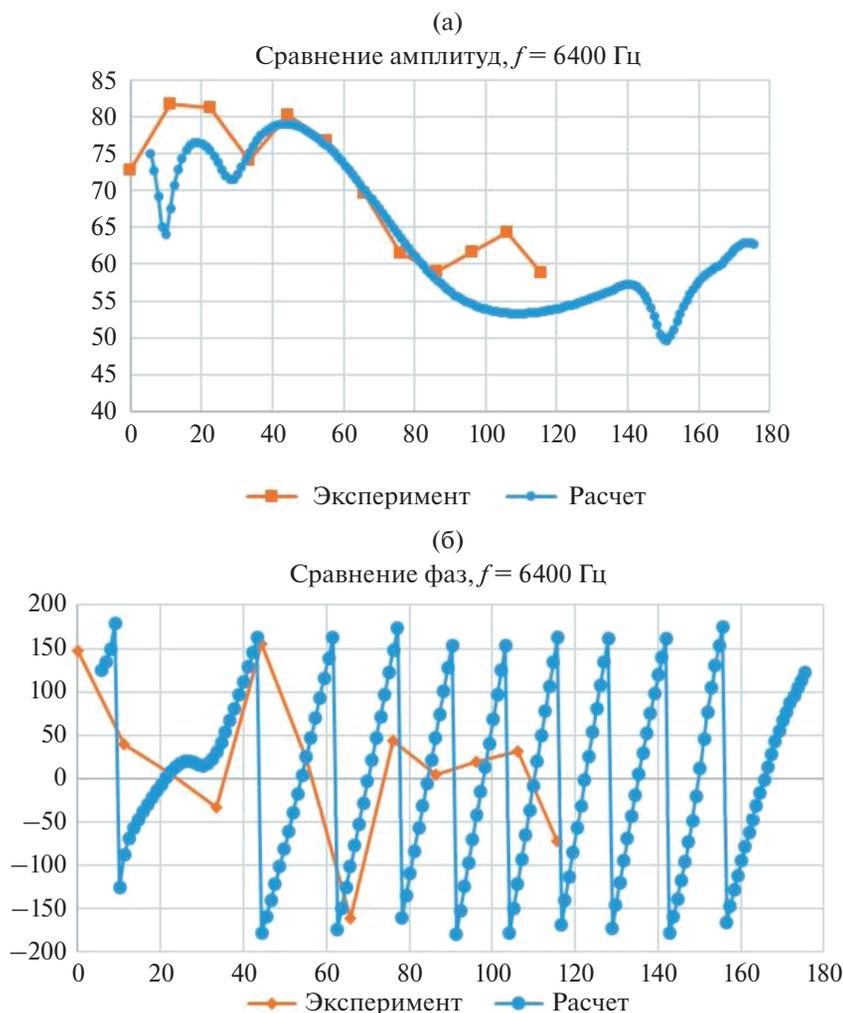


Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных амплитуд давления и фаз в дальнем поле для частоты $f = 6400$ Гц: (а) — амплитуды, (б) — фазы.

численных комплексных амплитуд звуковых мод на микрофонах дальнего поля при углах наблюдения, для которых существует наибольшая близость расчетного и экспериментального комплексных значений давлений. Эти результаты представлены на рис. 11а–11г. Красная линия соответствует измеренному комплексному давлению, а синяя линия соответствует вычисленному комплексному давлению, полученному путем суммирования комплексных амплитуд отдельных звуковых мод. Черная ломаная линия описывает процедуру последовательного суммирования амплитуд отдельных звуковых мод, причем каждый отрезок этой линии соответствует отдельному вкладу некоторой звуковой моды.

Во-первых, диаграммы, представленные на рис. 11а–11г, демонстрируют, что почти все коррелированные звуковые моды участвуют в формировании направленности дальнего поля, даже

если они имеют очень малую амплитуду в канале. Во-вторых, векторный тип сложения более 40 отдельных звуковых мод в дальнем поле может привести к значительным отклонениям при относительно небольших ошибках в определении комплексных амплитуд звуковых мод. Кроме этого, необходимо еще учитывать и паразитный шум, сгенерированный стенками канала (табл. 2), который также коррелирован с полезным сигналом. Поскольку аналогичная картина наблюдается для всех рассмотренных случаев и частот, можно сделать вывод, что результаты валидации можно охарактеризовать как очень хорошие.

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе разработан метод модального анализа звукового поля в каналах применительно к коррелированным звуковым модам. Особенностью метода является то, что эффект от-

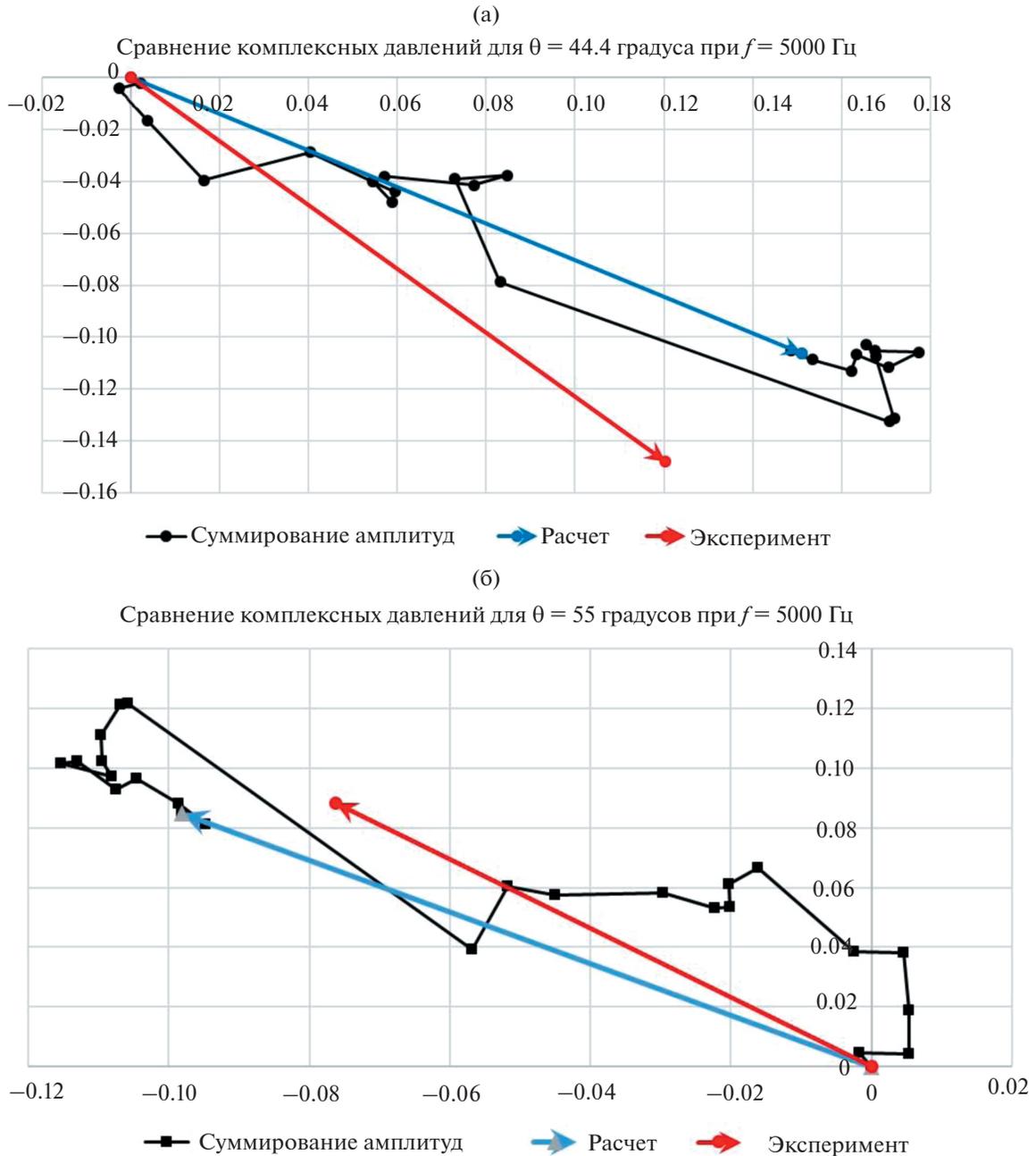


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и расчетных комплексных давлений в дальнем поле: (а) – частота 5000 Гц, угол наблюдения 44.4 градуса; (б) – частота 5000 Гц, угол наблюдения 55 градусов; (в) – частота 6000 Гц, угол наблюдения 55 градусов; (г) – частота 6400 Гц, угол наблюдения 55 градусов (Продолжение см. на следующей странице).

ражения звуковых мод от открытого конца канала обратно в канал учитывается на основе численного или аналитического расчета коэффициентов отражения. Такое представление звукового поля позволяет почти вдвое сократить количество неизвестных амплитуд звуковых мод, т.е. известны только амплитуды звуковых мод в падающей звуковой волне, а отраженное звуковое поле вычисляется по амплитудам падающего звука.

Валидация метода была проведена в заглушенной камере АК-2 с помощью маломасштабной модели воздухозаборника в условиях отсутствия потока на основе сравнения расчетной и экспериментальной направленности в дальнем поле. Для выделения модального состава звукового поля использовалась решетка из 48 микрофонов. Измерения в дальнем поле и в канале были синхронизированы друг с другом, так что последующая обработка могла выполняться единообразно

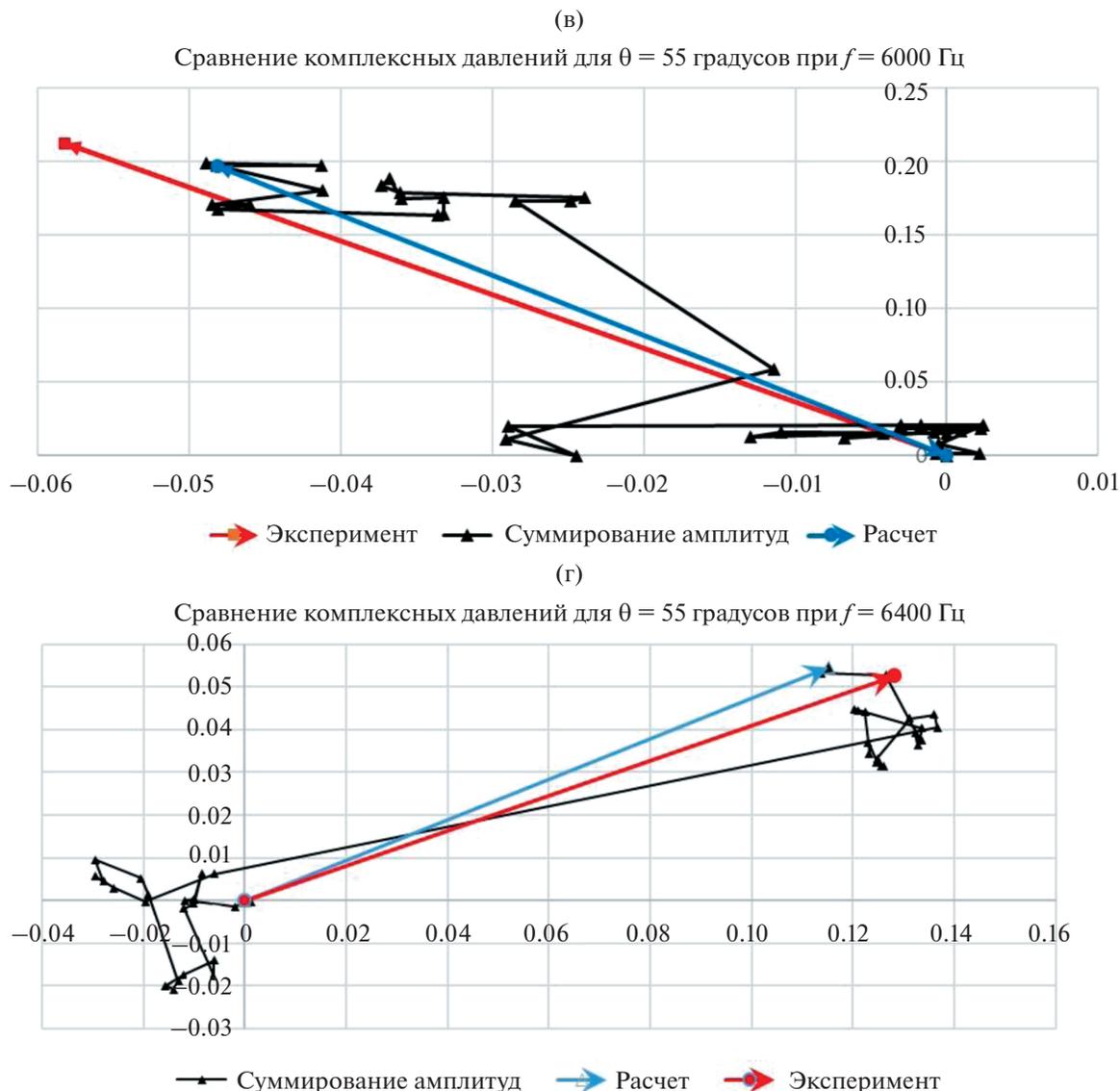


Рис. 11. Окончание.

с целью последующего сравнения как амплитудных, так и фазовых значений. Поскольку случай генерации коррелированных звуковых мод очень чувствителен к присутствию посторонних источников звука, например, к звуку, генерируемому вибрациями внешней поверхности модели воздухозаборника, то для повышения точности пришлось приложить значительные усилия в методической части экспериментальных исследований.

На основе найденных амплитуд звуковых мод с использованием аналитического решения по излучению звука из полубесконечного цилиндрического канала были рассчитаны амплитудные и фазовые характеристики звукового поля на микрофонах полярной решетки в дальнем поле. Далее полученные расчетные значения сравнивались с экспериментальными данными.

В результате разработанный метод модальной декомпозиции был успешно апробирован до частоты 6400 Гц ($ka \approx 11.7$). На этой верхней частоте количество распространяющихся коррелированных звуковых мод в канале составляло 46 при использовании 48 микрофонов в решетке. Таким образом, метод декомпозиции коррелированных мод оказался валидированным для случая, когда количество распространяющихся мод в канале не превышает количество микрофонов.

Основной вывод настоящей работы состоит в том, что случай генерации коррелированных звуковых мод в канале является наиболее сложным для прогнозирования направленности излучения в дальнем поле, поскольку в его формировании участвуют почти все звуковые моды, даже если их амплитуды в канале очень малы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-71-30016) на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2022-1036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dougherty R.P., Mendoza J.M.* Nacelle In-duct Beamforming using Modal Steering Vectors // AIAA Paper. 2008. 2008–2812.
2. *Sijtsma P.* CLEAN based on spatial source coherence // Int. J. Aeroacoustics. 2009. V. 6. № 4. P. 357–374.
3. *Lowis C.R., Joseph P.F., Kempton A.J.* Estimation of the far-field directivity of broadband aeroengine fan noise using an in-duct axial microphone array // J. Sound. Vib. 2010. V. 329. P. 3940–3957.
4. *Tester B.J., Murray P.B.* An in-duct to far-field phased array technique for validation of fan broadband liner performance at representative Mach numbers // AIAA Paper. 2013. 2013–2211.
5. *Tester B.J., Özyörük Y.* Predicting far-field broadband noise levels from in-duct phased array measurements // AIAA Paper. 2014. 2014–2913.
6. *Tester B.J., Özyörük Y., Sutliff D.L., Bozak R.F.* Predicting far-field broadband noise levels from in-duct phased array measurements // ICSV-22. Florence (Italy) 12–16 July. 2015.
7. *Dougherty R.P.* Mutual Incoherence of Broadband Duct Acoustic Modes // AIAA Paper. 2016. 2016–3032.
8. *Tapken U., Pardowitz B., Behnz M.* Radial mode analysis of fan broadband noise // AIAA Paper. 2017. 2017–3715.
9. *Dougherty R.P., Bozak R.F.* Two-dimensional Modal Beamforming in Wavenumber Space for Duct Acoustics // AIAA Paper. 2018. 2018–2805.
10. *Fauqueux S., Davy R.* Modal Deconvolution Method in a Finite Circular Duct, using Flush-mounted Microphones // AIAA Paper. 2018. 2018–3927.
11. *Fauqueux S., Davy R., Méry F.* Duct modal detection tool to characterize the noise source generated by an air pump // AIAA Paper. 2019. 2019–2419.
12. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Яковец М.А., Ипатов М.С., Кругляева А.Е., Сидоров С.Ю.* Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статических условиях и в потоке // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 1. С. 59–73.
13. *Tam C.K.W., Parrish S.A., Envia E., Chien E.W.* Physics of Acoustic Radiation from Jet Engine Inlets // AIAA Paper. 2012. 2012–2243.
14. *Ostrikov N.N., Yakovets M.A., Ipatov M.S., Pankratov I.V., Denisov S.L.* Experimental study of the effect of flow velocity at the inlet on the azimuthal mode radiation: static and flight // 24th Int. Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, 2017.
15. *Вайнштейн Л.А.* // Докл. АН СССР. 1947. Т. 58. № 11. С. 1957.
16. *Levine H., Schwinger J.* Radiation of sound from a circular pipe // Phys. Rev. 1948. V. 73. P. 383–406.
17. *Вайнштейн Л.А.* Теория дифракции и метод факторизации. М.: Советское радио, 1966. 432 с.
18. *Lympany S.V., Karon A.Z., Wadsworth M.L., Funk R., Ahuja K.K.* An Experimental Facility for Measuring the Acoustic Reflection and Transmission of Higher-Order Modes in Heated Flows, Part 1: Design and Methodology // AIAA Paper. 2018. 2018–3133.
19. *Остриков Н.Н.* Асимптотический метод учета влияния пограничного слоя высокоскоростного потока на характеристики распространения звуковых мод в цилиндрическом канале с жесткими стенками // Докл. Рос. Акад. наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 1. С. 104–112.