

## ОБОБЩЕНИЕ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА “БИМФОРМИНГ” ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕСИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ

© 2022 г. М. А. Демьянов<sup>а</sup>, \*, О. П. Бычков<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

\*e-mail: demyanov@phystech.edu

\*\*e-mail: oleg.bychkov@tsagi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 19.10.2021 г.

Принята к публикации 30.11.2021 г.

Произведено обобщение стандартного алгоритма Conventional Beamforming, позволяющее взаимно учитывать данные последовательных измерений одной микрофонной решеткой, располагаемой в различных положениях по отношению к области генерации звука. В случае отсутствия непосредственной возможности применения микрофонных решеток необходимой геометрии в системе синхронного измерения, обобщенный алгоритм позволяет заменить измерение решеткой сложной конфигурации набором измерений одной микрофонной решеткой, последовательно помещаемой в различных положениях. Верификация и валидация модифицированного метода производится при помощи численного моделирования, а также при помощи результатов проведенных экспериментов в акустической заглушенной камере АК-2 ЦАГИ, где в качестве источников шума использовались акустические динамики.

*Ключевые слова:* несинхронные измерения, микрофонные решетки, фазированная антенна, 3D beamforming

DOI: 10.31857/S0320791922020022

### ВВЕДЕНИЕ

В аэроакустике значимым инструментом для экспериментальной идентификации источников звука являются методы, основанные на фазированных микрофонных решетках (акустических антеннах) [1]. Общая методология применения фазированных микрофонных решеток в аэроакустическом эксперименте получила название “бимформинг” [2]. Изначально алгоритмы “бимформинг” были ориентированы на использование плоских микрофонных решеток, с помощью которых удается определить лишь направление на источник акустического излучения. В дальнейшем стали применяться более сложные геометрии микрофонных решеток, адаптированные под различные типы направленности и области распределения звуковых источников [3–5]. Изготовление решеток сложной пространственной геометрии является технологически трудным процессом, кроме того использование большего количества микрофонов в подобных решетках увеличивает стоимость соответствующей аппара-

туры. В данной работе произведено обобщение стандартного алгоритма “бимформинг”, основанное на возможности его применения к измерениям, проведенным с помощью одной микрофонной решетки в различных независимых положениях. Идея разработанного метода заключается в естественном учете корреляционных соотношений, составляющих матрицы взаимных спектров различных положений микрофонной решетки. Полученная процедура позволяет заменить использование микрофонной решетки сложной пространственной геометрии последовательностью независимых измерений одной микрофонной решеткой в различных положениях. В частности, в данной работе проведена валидация разработанного алгоритма на конфигурации из двух положений плоской микрофонной решетки в виде прямого двугранного угла, и продемонстрировано, что применение обобщенного алгоритма действительно позволяет осуществить трехмерную локализацию звуковых источников без использования решетки микрофонов сложной конфигурации.

ОБОБЩЕНИЕ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА “БИМФОРМИНГ”: УЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ СОВОКУПНОСТИ МАТРИЦ ВЗАИМНЫХ СПЕКТРОВ, ПОСТРОЕННЫХ ПО МНОЖЕСТВУ НЕЗАВИСИМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОДНОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Схема, используемая в методологии “бимформинг”, может быть достаточно просто изложена в общей постановке обратной задачи нахождения звуковых источников по индуцируемому акустическому полю. С помощью массива микрофонов (микрофонной решетки, акустической антенны) производится синхронная по времени запись сигналов  $p_i$ . Область пространства, где предположительно должны располагаться источники звука, разбивается на дискретную сетку, каждому узлу которой ставится в соответствие звуковой источник с заранее неизвестной амплитудой  $a_i$ . Таким образом, давление  $p_i$  в Фурье-пространстве может быть представлено в виде суммирования произведений направляющих векторов  $q_i$  на амплитуды  $a_i$  по узлам сетки источников:

$$p_i = \sum_{j=1}^{N_s} G_{ij} a_j, \tag{1}$$

где направляющие векторы (столбцы матрицы  $G_{ij} = (q_1 | q_2 | \dots | q_{N_s})$ ) характеризуют направленность единичного звукового источника, т.е.  $G_{ij}$  – амплитуда сигнала, индуцируемого единичным источником, расположенным в  $j$ -ом узле сетки источников, на  $i$ -ом микрофоне.

Выбор типа направляющих векторов  $G_{ij}$  определяется в соответствии с физической моделью генерируемого акустического излучения в конкретном случае. В простейшем варианте предполагается монополярная направленность источников  $G_{ij} = e^{ik|x_i - y_j|} / |x_i - y_j|$ . В качестве примера акустического излучения, где монополярная модель источников приводит к некорректному результату, можно привести шум, возникающий при обтекании твердого цилиндра [6]. В этом случае уместно использовать модель дипольных источников звука  $G_{ij} = (\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_j, \mathbf{e}) e^{ik|x_i - y_j|} / |x_i - y_j|^2$  [7, 8].

Используя выражение для давлений  $p_i$ , можно выписать представление корреляционной матрицы взаимных спектров  $C_{ij} = \overline{p_i p_j^*}$  через амплитуды источников  $a_i$ :

$$C_{ij} = \overline{p_i p_j^*} = \overline{\left( \sum_{k=1}^{N_s} G_{ik} a_k \right) \left( \sum_{p=1}^{N_s} G_{jp} a_p \right)^*} = \sum_{k=1, j=1}^{N_s} G_{ik} G_{jp}^* a_k a_p^*. \tag{2}$$

Стандартным алгоритмом, применяющимся при обработке данных, полученных с помощью микрофонной решетки, является conventional beamforming (CB). В рамках данного алгоритма используется предположение о некоррелированности источников акустического излучения:

$$\overline{a_i a_j^*} = \begin{cases} |a_i|^2, & i = j; \\ 0, & i \neq j; \end{cases}$$

приводящее к более простому выражению для матрицы взаимных спектров:

$$C_{ij} = \overline{p_i p_j^*} = \sum_{k=1}^{N_s} G_{ik} G_{jk}^* \overline{|a_k|^2}, \tag{3}$$

которое, в свою очередь, в матричной форме (через направляющие векторы  $q_k$ ) принимает вид:

$$C = \overline{pp^H} = \sum_{k=1}^{N_s} q_k q_k^H \overline{|a_k|^2}. \tag{4}$$

Расчетная формула CB может быть получена из решения оптимизационной задачи:

$$\|C - A_i q_i q_i^H\|_2 \xrightarrow{A_i} \min,$$

где  $A_i = \overline{|a_i|^2}$ ;  $\|\dots\|_2$  – евклидова норма (корень из суммы квадратов модулей компонент). Отсюда выражение для мощности  $i$ -го источника вычисляется по формуле:

$$A_i = \frac{q_i^H C q_i}{\|q_i\|_2^4}. \tag{5}$$

В работах [5, 9] рассматривалась возможность трехмерной локализации акустических источников различной мультиполярности с помощью метода мультипликативного бимформинга, суть которого заключается в осредненном перемножении результатов локализации источников для различных ортогональных положений микрофонной решетки. Подобная техника позволяет подавить непересекающуюся часть лепестков в акустических изображениях от различных положений микрофонной решетки и, тем самым, локализовать источник в объеме. В работе [10] данную технику использовали с целью получения трехмерной локализации основных источников шума крупномасштабной модели самолета.

В данной работе произведено обобщение алгоритма CB путем естественного учета корреляции

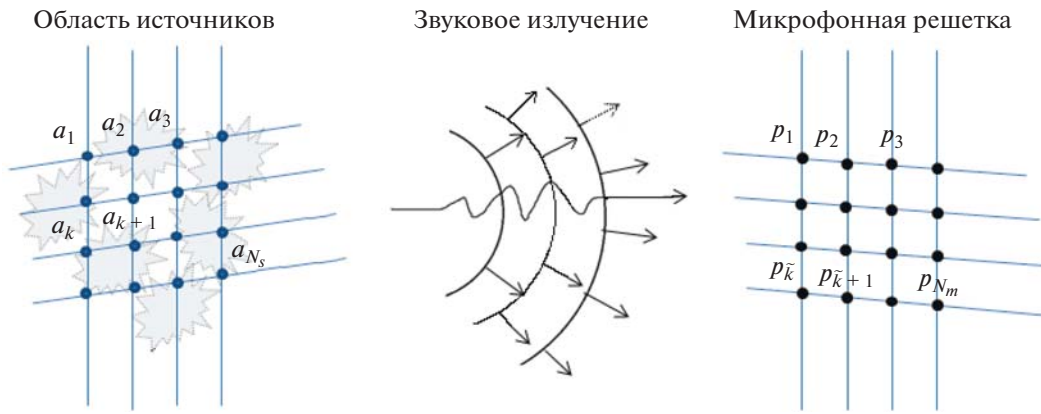


Рис. 1. Схема, поясняющая структуру методов “бимформинг”.

онных соотношений множества матриц взаимных спектров, которые могут быть измерены за счет расположения микрофонной решетки в различных пространственных положениях, относительно области акустического излучения:

$$\|C_1 - A_i q_i^1 q_i^{1H}\|_2^2 + \|C_2 - A_i q_i^2 q_i^{2H}\|_2^2 + \dots + \|C_{N_{\text{pos}}} - A_i q_i^{N_{\text{pos}}} q_i^{N_{\text{pos}}H}\|_2^2 \xrightarrow{A_i} \min,$$

где  $\{C_i\}_{i=1}^{N_{\text{pos}}}$  — матрицы взаимных спектров,  $i$  — номер положения микрофонной решетки,  $N_{\text{pos}}$  — число различных положений микрофонной решетки.

Значение  $A_i$ , при котором достигается минимум, имеет вид:

$$A_i = \frac{q_i^{1H} C_1 q_i^1 + q_i^{2H} C_2 q_i^2 + \dots + q_i^{N_{\text{pos}}H} C_{N_{\text{pos}}} q_i^{N_{\text{pos}}}}{\|q_i^1\|_2^4 + \|q_i^2\|_2^4 + \dots + \|q_i^{N_{\text{pos}}}\|_2^4}. \quad (6)$$

Полученная формула является обобщением стандартного алгоритма “бимформинг”. Она позволяет корректно обрабатывать конфигурации источников, требующие микрофонную решетку сложной пространственной геометрии, заменяя ее последовательностью независимых измерений одной микрофонной решеткой.

В недавней работе [11] также произведено обобщение стандартного алгоритма “бимформинг” для обработки несинхронизированных измерений микрофонной решеткой. Авторы предложили методику, основанную на регуляризации корреляционной матрицы спектров, направленную на восстановление корреляционных соотношений

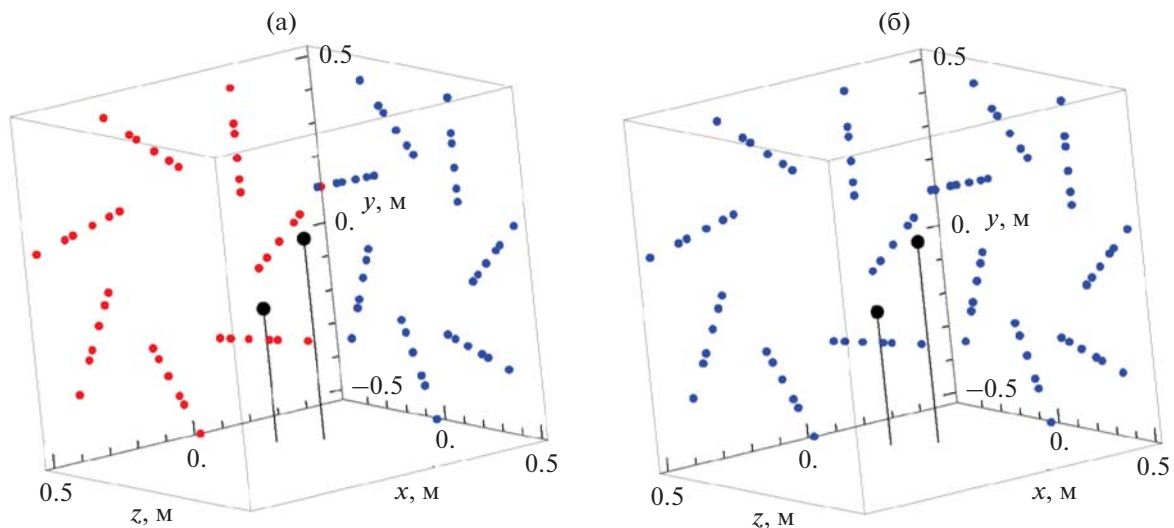
из отсутствующих недиагональных блоков. В текущей работе отличительной чертой является отсутствие необходимости восстановления недостающих элементов в матрице взаимных спектров. Предложенная процедура позволяет правильно учесть имеющуюся неполную информацию о корреляциях между микрофонами и восстановить как положение источника в пространстве, так и корректно определить его амплитуду. Такой эффект достигается за счет коррекции самой вычислительной формулы алгоритма “бимформинг”. В то время как в работе [11] используется стандартная формула, требующая процедуры восстановления недостающих элементов.

#### ЧИСЛЕННАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Верификация обобщенного алгоритма была проведена на примере объемной локализации акустического источника с помощью измерений одной плоской микрофонной решеткой, последовательно расположенной в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — в конфигурации типа прямого двугранного угла.

Известно, что с помощью двугранной микрофонной решетки возможна трехмерная локализация источников звука [3]. Для модифицированного метода достаточно произвести независимые последовательные измерения одной микрофонной решеткой в положениях плоскостей двугранного угла. Это позволяет локализовать источник в объеме без реального использования двугранной микрофонной решетки.

Для проведения верификации в качестве модельных источников была выбрана пара некоррелированных точечных монополей. Решетка “чис-



**Рис. 2.** Конфигурации позиций снятия информации (“численных микрофонов”): (а) — моделирующее последовательное расположение стандартной плоской микрофонной решетки в двух гранях прямого двухгранного угла; (б) — одновременное расположение двух решеток микрофонов.

ленных микрофонов” представляла собой массив из 42 микрофонов, расположенных на 7 лучах, повернутых в виде спирали. Диаметр решетки равен 1 метру. Частота моделируемых источников звука — 2000 Гц.

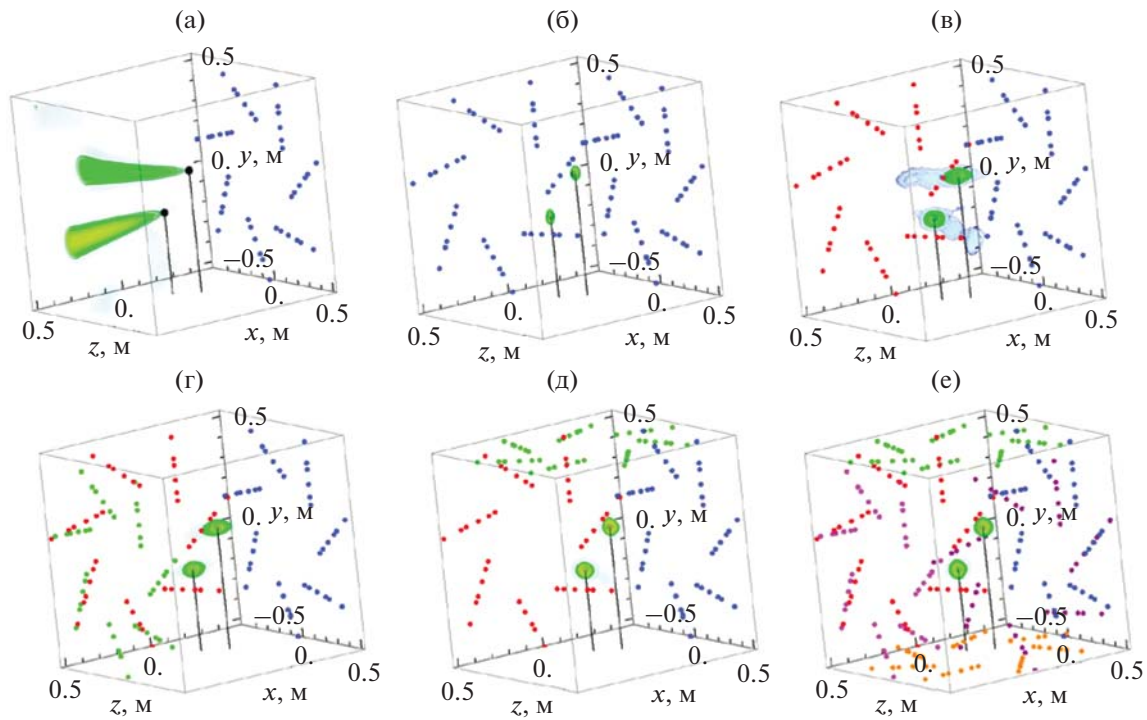
Конфигурация последовательного расположения одной микрофонной решетки представлена на рис. 2а. Первая позиция измерений (синие точки) — в плоскости  $z = -0.5$  м с центром решетки в точке  $(0, 0, -0.5)$ , вторая (красные) — в плоскости  $x = -0.5$  м с центром решетки в  $(-0.5, 0, 0)$ . На рисунке отмечено также положение монополярных источников (черные точки) —  $(0, 0.1, -0.1)$  и  $(-0.1, -0.1, 0)$ .

Результат обработки данных с помощью описанного выше обобщенного алгоритма представлен на рис. 3б.

Было проведено сравнение трехмерных акустических карт, полученных с помощью разработанного метода и стандартным алгоритмом СВ. Для алгоритма СВ применялась как одиночная плоская решетка, так и полная двугранная микрофонная решетка, представляющая собой объединение двух положений плоской решетки, используемой в обобщенном алгоритме. На рис. 3а, 3в приведены результаты применения стандартного СВ для случая одиночной плоской решетки и более сложной двугранной решетки, соответственно.

Прежде всего, можно отметить, что использование стандартного алгоритма в случае обработки

измерений единственной плоской решетки микрофонов (рис. 3а) не позволяет произвести локализацию акустического источника в объеме. В данном случае результат локализации позволяет определить лишь направление на источник. В то же время использование дополнительных результатов измерения плоской решеткой во втором положении и обработка их предложенным обобщенным методом позволяет произвести корректную локализацию источников в объеме (рис. 3б). При этом из рис. 3в видно, что использование стандартного метода в случае двугранной решетки также позволяет произвести локализацию источников в объеме, причем область локализации имеет более компактный характер в сравнении с независимыми измерениями. Это связано с тем, что матрица взаимных спектров, измеренная с помощью полной двугранной решетки, содержит корреляционные соотношения между всеми парами микрофонов. В то время как пара независимых измерений с помощью плоской микрофонной решетки, поочередно расположенной на гранях угла, позволяет получить две матрицы взаимных спектров, в каждой из которых учтены корреляционные соотношения между микрофонами соответствующей грани. Таким образом, если обозначить за  $N_m$  число микрофонов плоской решетки, то для одного измерения полной двугранной решеткой имеем  $(2N_m)^2 = 4N_m^2$  корреляционных соотношений, в то время как для пары измерений плоской микрофонной решеткой по-



**Рис. 3.** Результат трехмерной локализации пары источников шума при помощи различных методов для полосы шириной 32 Гц с центральной частотой 2000 Гц: (а) – обработка измерений одной (правой) решеткой микрофонов стандартным алгоритмом СВ; (б) – обработка одновременных измерений двумя решетками микрофонов стандартным алгоритмом СВ; (в) – обработка последовательных измерений одной решеткой в двух положениях предложенным обобщенным методом; (г) – обработка последовательных измерений одной решеткой в трех положениях предложенным обобщенным методом; (д) – обработка последовательных измерений одной решеткой в трех положениях (ортогональные оси) предложенным обобщенным методом; (е) – обработка последовательных измерений одной решеткой в шести положениях предложенным обобщенным методом. Динамический диапазон составляет 4 дБ.

лучим  $N_m^2 + N_m^2 = 2N_m^2$ . Следовательно, естественно ожидать, что результат, полученный с учетом в 2 раза меньшего числа корреляционных соотношений, будет менее точным. Тем не менее, проведенное обобщение алгоритма позволяет увеличить число корреляционных соотношений путем увеличения числа независимых измерений, проводимых для различных положений микрофонной решетки. Так, на рис. 3г, 3д продемонстрирован результат обработки обобщенным методом данных трех последовательных измерений плоской решеткой. В обоих случаях количество корреляционных соотношений составляло  $3N_m^2$ , однако в случае взаимного ортогонального расположения результат локализации становится более компактным, что указывает на важность не только количества корреляционных соотношений, но и правильного выбора последовательных положений решетки. На рис. 3е представлен результат обработки уже шести измерений плоской решеткой, последовательно расположенной в шести гранях. При этом результат локализации источ-

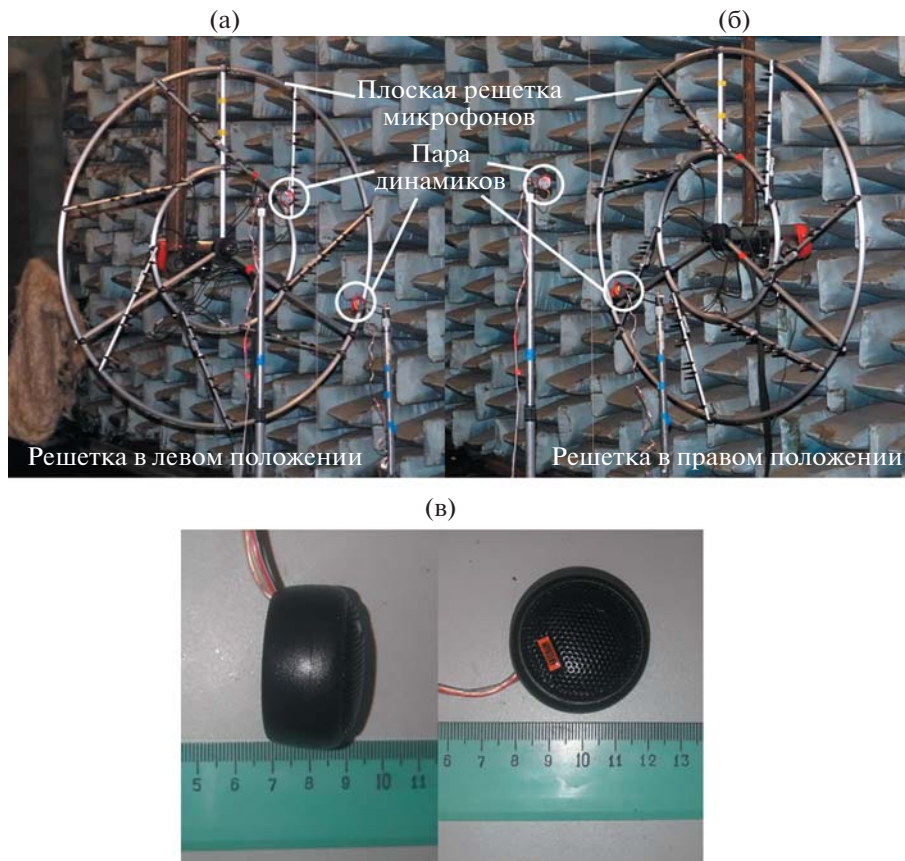
ников практически не отличался от случая последовательного расположения решетки в трех ортогональных гранях.

Таким образом, возможность увеличения точности локализации является одним из ключевых атрибутов разработанного метода. В то же время стандартный алгоритм не имеет потенциальной возможности улучшения результатов локализации путем воздействия на используемую микрофонную решетку, кроме ее принципиального изменения или замены.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для валидации разработанного метода обработки данных был проведен эксперимент, в котором в качестве источников шума использовались динамики MJ 1T 0.5" MYSTERY ELECTRONICS ltd. диаметром 3.4 см и толщиной 2.4 см (рис. 4в), на которые через двухканальный усилитель P2500S YAMAHA с генератора 3110 V&K, встроенного в систему 3560D, при помощи приложения Pulse V&K подавался широкополосный сигнал, имею-





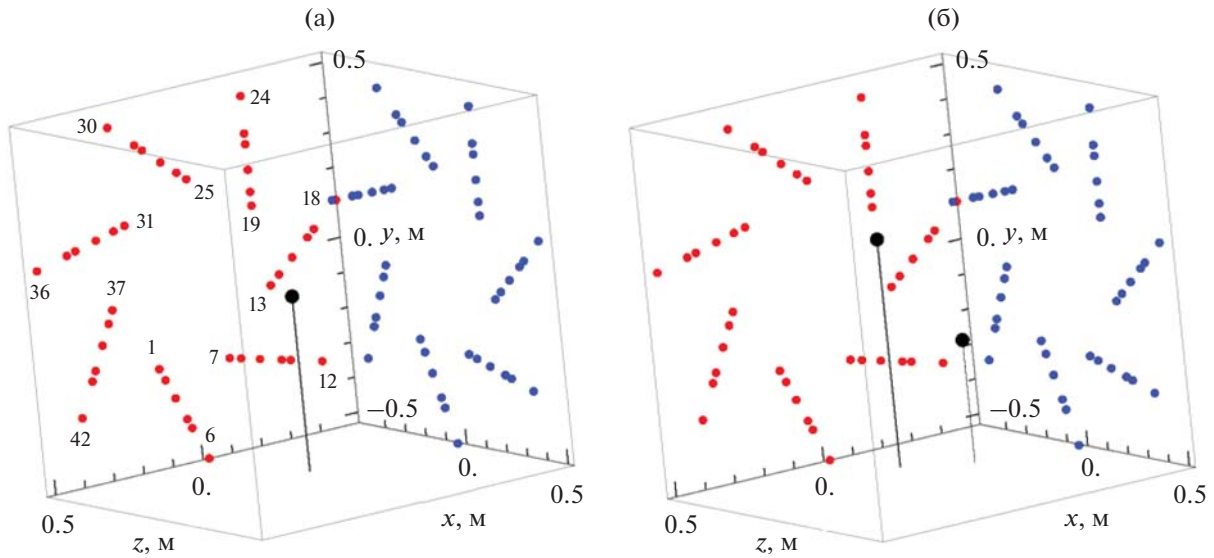
**Рис. 4.** Экспериментальное исследование возможности определения положения источника в объеме при помощи последовательных измерений в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ: (а) – плоская решетка микрофонов в левом положении; (б) – в правом положении; (в) – фотография динамиков.

ший спектральную характеристику в виде розового шума. При этом наличие двух параллельных каналов на генераторе и усилителе позволяло обеспечить подачу двух некоррелированных сигналов на два динамика. В качестве измерительной системы использовалась стандартная 42-канальная плоская решетка Brüel&Kjær диаметром 1 м с диапазоном рабочих частот  $\sim 0.3\text{--}6.4$  кГц (нумерация для первых и последних микрофонов луча представлена на рис. 5а). Микрофонная решетка могла поворачиваться так, чтобы ее можно было последовательно фиксировать в двух гранях угла таким образом, что динамики располагались внутри геометрического раствора двугранного угла (рис. 5).

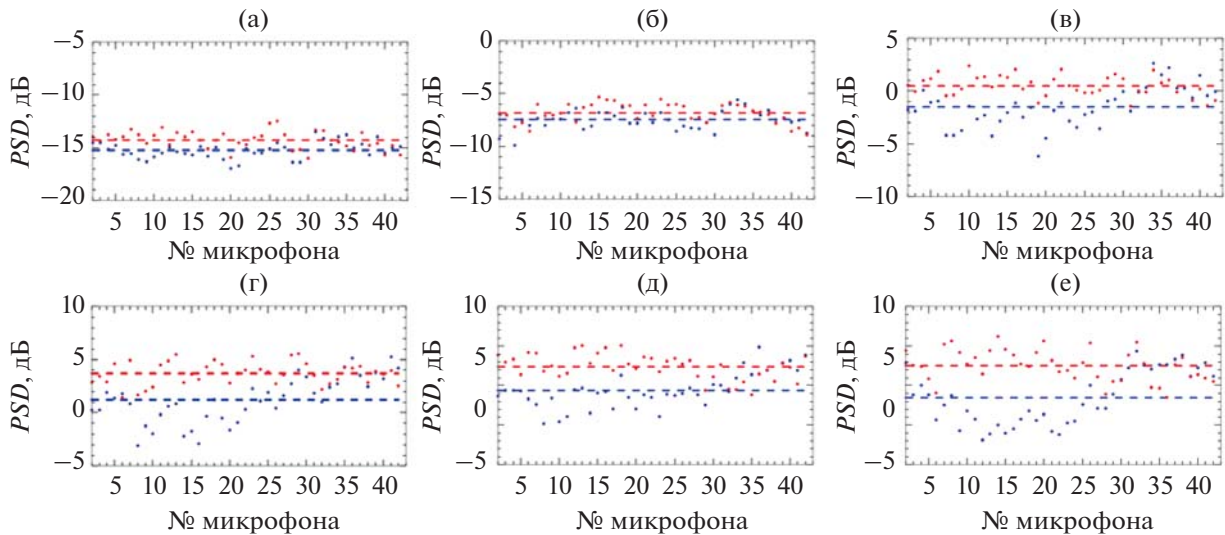
Для того чтобы понять, соответствуют ли исследуемые источники шума монопольным источникам, в первую очередь проведено исследование характеристик излучаемого центрированным динамиком (рис. 5а) звукового поля. На рис. 6 для различных частот представлены приведенные к 1 м плотности мощности пульсаций давления, из

которых были предварительно вычтены уровни фонового шума для 41-ого микрофона (первый микрофон не был задействован) в двух положениях микрофонной решетки. Можно отметить, что для частотного диапазона 1500–2000 Гц уровни пульсаций давления на всех микрофонах для обоих положений хорошо сопоставимы друг с другом, отклонение от среднего уровня (пунктир) не превышало 1–2 дБ. В тоже время для более высоких частот (2500 Гц и более) уровни пульсаций давления могли существенно расходиться друг с другом, что указывает на неоднородность направленности излучения звука динамиком в этой области частот.

Тем не менее, для локализации источников шума однородность направленности в смысле амплитуды пульсаций носит второстепенный характер. Важной же характеристикой при этом является однородность фазовой направленности. На рис. 7 цветными кривыми представлена фаза функции когерентности между сигналом микрофона № 7 (рис. 5а) и оставшимися сигналами 40-а



**Рис. 5.** Схемы расположения измерительной системы и динамиков: (а) — динамик в центре заметаемого объема, (б) — пара разнесенных динамиков. Синими точками обозначены микрофоны плоской решетки в правом положении, красными — в левом положении, черные точки — динамики.

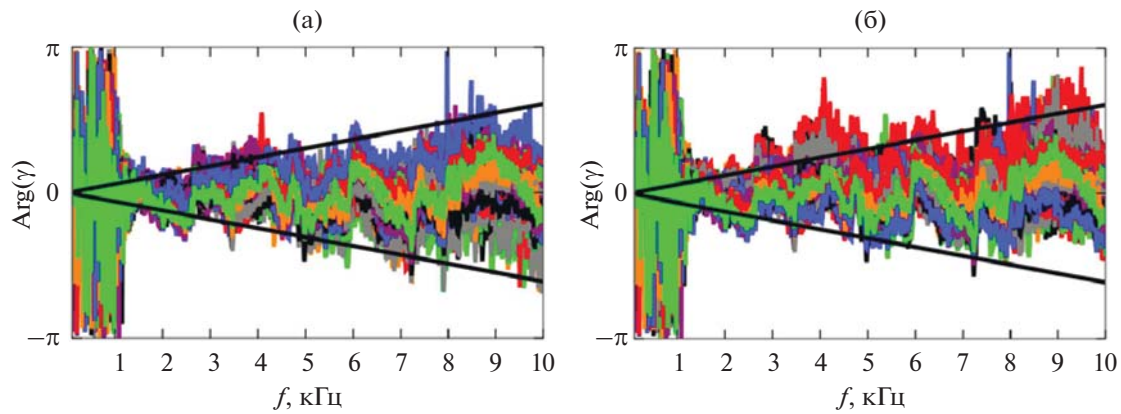


**Рис. 6.** Приведенная спектральная плотность мощности пульсаций давления, измеренная микрофонами в случае центрированного динамика для различных частот: (а) — 1500; (б) — 2000; (в) — 2500; (г) — 3000; (д) — 3500; (е) — 4000 Гц. Красные точки — результаты для решетки в левом положении, синие точки — в правом положении. Пунктир — средний уровень, посчитанный для соответствующего положения решетки.

микрофонов с учетом запаздывания сигнала из-за разного расстояния между источником и микрофонами. Можно отметить, что для обоих положений микрофонной решетки разница фаз между базовым сигналом и сигналами оставшихся микрофонов для  $f > 1500$  Гц (когда полезный сигнал начинал преобладать над фоновым шумом) оста-

валась в пределах границ точности определения фазы  $d\varphi = \omega dt$  (черные прямые), где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $dt = 2^{-15}$  с — дискретизация сигналов по времени.

Таким образом, из анализа данных для динамика в центральном положении (рис. 5а), в связи с однородностью по фазе направленности излу-



**Рис. 7.** Фаза функции когерентности между сигналом микрофона № 7 и сигналами оставшихся 40-а микрофонов для различных положений решетки с учетом запаздывания сигнала. (а) – Правое положение решетки; (б) – левое положение решетки. Черные прямые – точность определения фазы  $\Delta\varphi$ , связанная с дискретизацией сигналов по времени.

чения динамиком (рис. 7), можно сделать вывод о применимости использования обобщенного стандартного алгоритма “бимформинг”, в рамках которого рассматривается монополярная направленность источников.

#### ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Первоначально для валидации разработанного метода рассмотрен случай единственного динамика, расположенного в центре заметаемого объема (рис. 5а). На рис. 8 для различных частотных полос представлены результаты локализации источника шума в заметаемом двумя положениями решетки микрофонов объеме. При обработке использовалась дискретная сетка равномерно распределенных источников с шагом 0.02 м, заметающих куб с гранью в 1 м. Для случая, когда уровни полезного сигнала еще не преобладали над уровнем фонового шума, результат локализации динамика был искажен (рис. 8а). Однако можно отметить, что с увеличением рассматриваемой частоты и началом доминирования полезного сигнала на фоне уровней фонового шума локализация разработанным методом позволяла определить с хорошей точностью положение динамика в объеме.

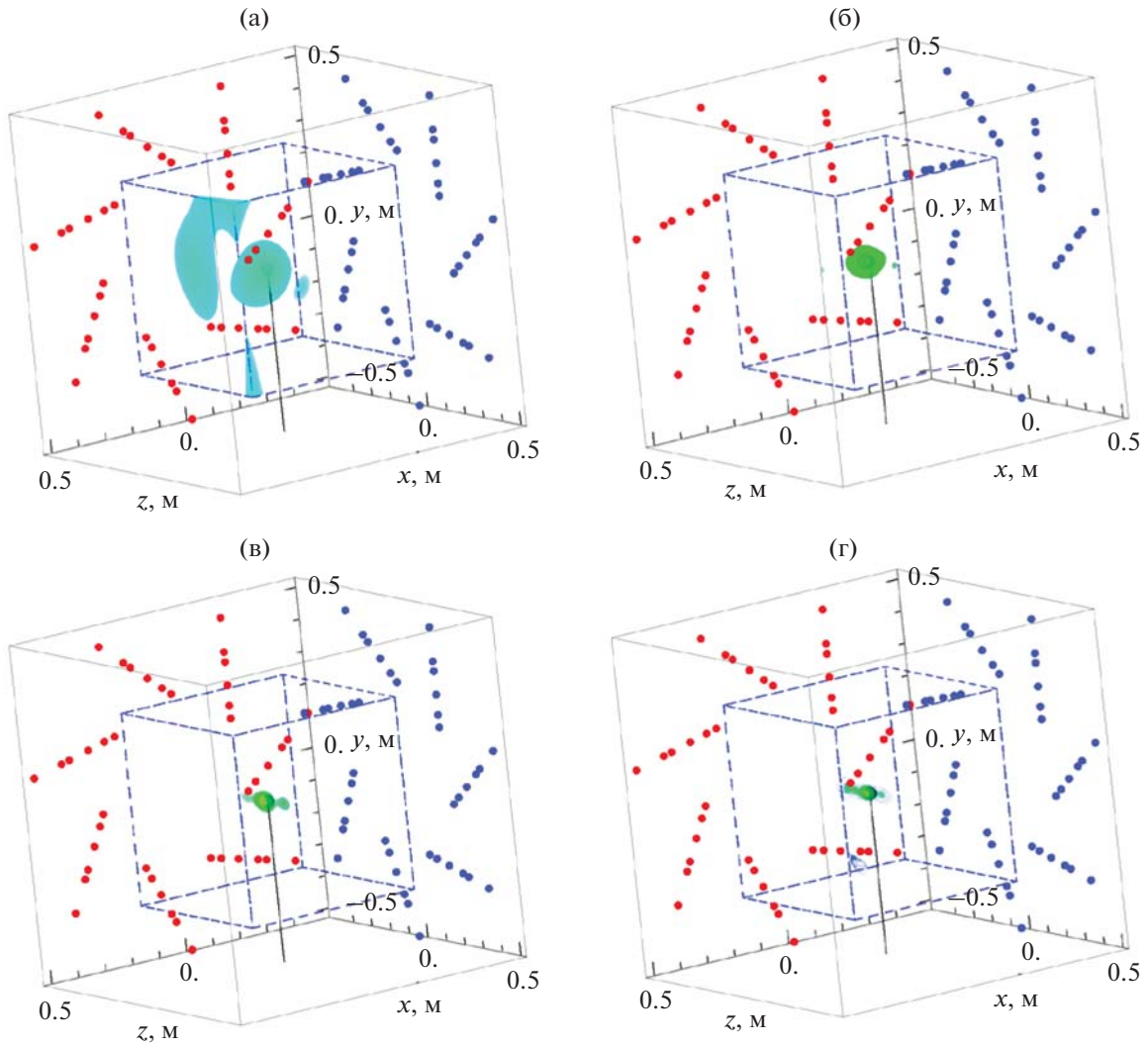
Как отмечалось выше, модифицированный метод “бимформинг” позволяет не только локализовать источник, но и определить его спектральную характеристику. На рис. 9 представлено сравнение экспериментальных, осредненных по микрофонам решетки в двух положениях, данных (рис. 6, среднее от двух значений, отмеченных пунктиром) о спектре излучаемого шума, приведенного к 1 м, и результатов локализации пред-

ставленным методом для различных частотных полос (максимальное значение амплитуды источника, рис. 8).

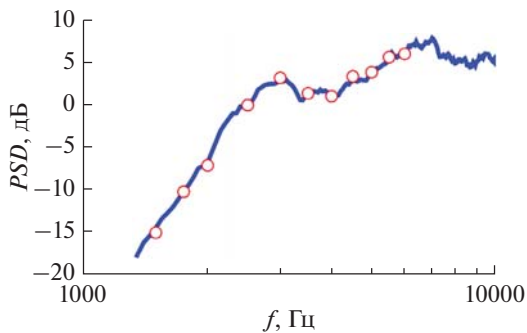
Можно отметить, что результаты локализации в смысле амплитуды источника в дБ на заданной частоте практически полностью (точность  $\sim 0.6$  дБ) сопоставляются с экспериментальными данными. Далее исследовалась возможность локализации источников более сложной конфигурации (рис. 5б). При этом в эксперименте для данной конфигурации не были задействованы микрофоны № 1 и № 25–30. На рис. 10 изображен результат локализации для пары источников при помощи модифицированного метода на основе данных, полученных двумя последовательными измерениями решеткой микрофонов в двух положениях. При обработке использовалась та же сетка источников, что и ранее. Можно отметить, что, как и в случае одного рассмотренного ранее источника, в случае двух разнесенных динамиков представленный метод позволяет идентифицировать положение источников шума. Чтобы объяснить различные картины локализации, необходимо обратиться к спектральным характеристикам, определенным модифицированным методом в областях расположения динамиков.

На рис. 11 представлены определенные модифицированным методом спектры излучения шума на 1 м каждым из динамиков (синие и красные символы), также черными символами отмечен результат определения частотной характеристики единственного динамика (рис. 9, символы). Можно видеть, что определенные частотные характеристики одного и того же динамика в двух конфигурациях (красные и черные символы) практически полностью совпадают, что и следо-



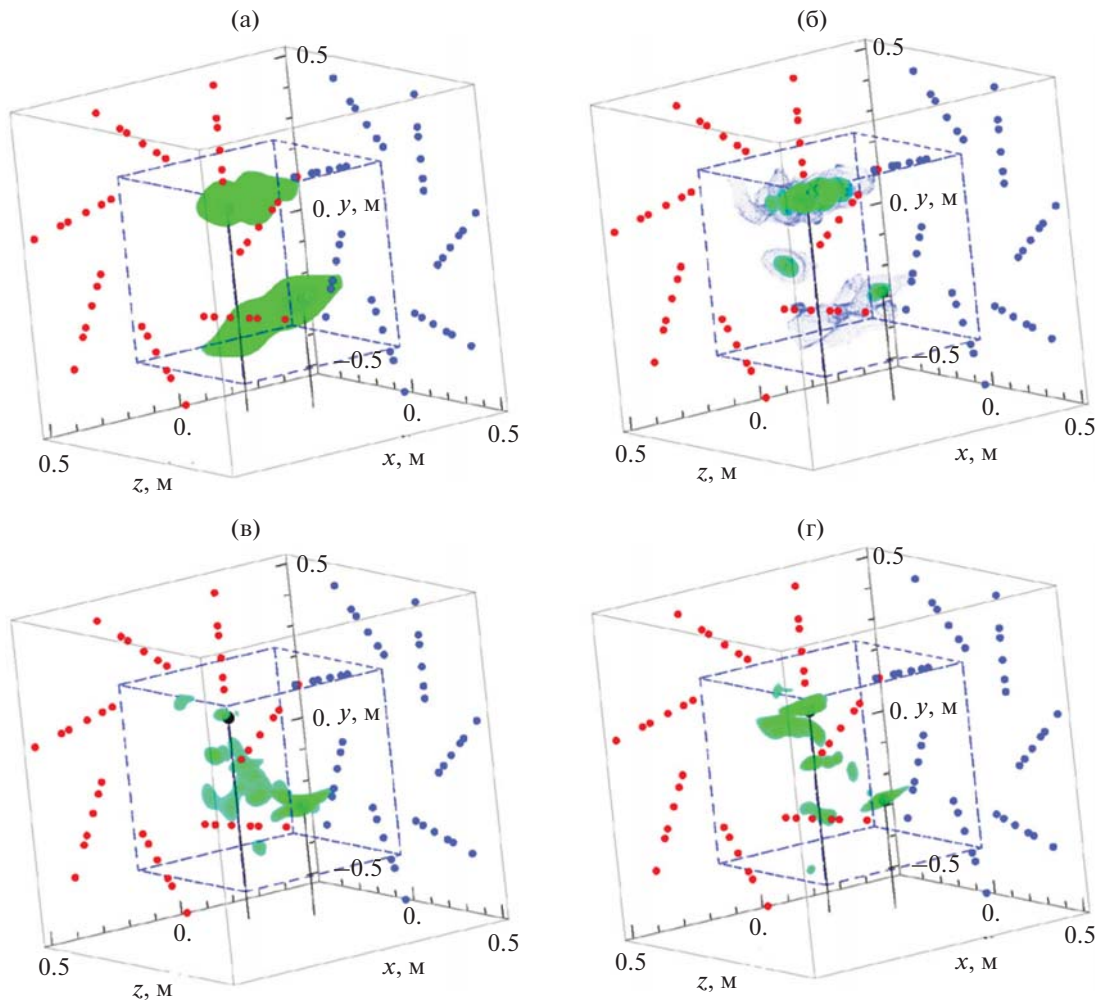


**Рис. 8.** Результат трехмерной локализации источника шума при помощи разработанного метода для полосы шириной 32 Гц с различной центральной частотой: (а) – 1000; (б) – 2000; (в) – 3000; (г) – 4000 Гц. Динамический диапазон составляет 4 дБ. Синим пунктиром выделена область визуализации.

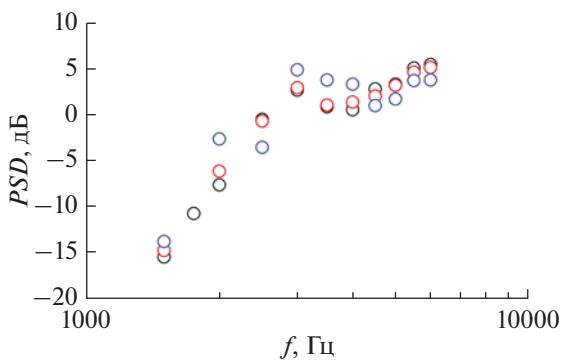


**Рис. 9.** Сравнение экспериментально определенного среднего спектра излучаемого динамиком на 1 м шума (синяя кривая) с определенными с помощью модифицированного метода амплитудами источников шума в различных полосах частот (символы).

вало ожидать. В тоже время частотная характеристика второго динамика (синие символы) в разных частотных полосах могла существенно отличаться, что можно связать с различными амплитудно-частотными характеристиками двух динамиков, поскольку сигнал на них подавался одинаковой амплитуды. Таким образом, когда амплитуды излучения двух динамиков практически совпадали (для 1500 Гц разница составляет 0.9 дБ), то результат локализации имел симметричный характер (рис. 10а); в то время как для случая доминирования одного из динамиков как источника шума (для 2500 Гц разница составляет 2.9 дБ) локализовался в основном именно этот динамик (рис. 10б).



**Рис. 10.** Результат трехмерной локализации пары источников шума при помощи разработанного метода для полосы шириной 32 Гц с различной центральной частотой: (а) – 1500; (б) – 2500; (в) – 3500; (г) – 4500 Гц. Динамический диапазон составляет 6 дБ. Синим пунктиром выделена область визуализации.



**Рис. 11.** Сравнение определенных с помощью модифицированного метода амплитуд источников шума в различных полосах частот. Черные символы – результат для случая локализации центрированного динамика (символы, рис. 9); красные – результат для того же динамика в случае локализации двух динамиков; синие – результат для второго динамика.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведено обобщение стандартного алгоритма “бимформинг”, позволяющее обрабатывать данные, полученные последовательными несинхронными измерениями микрофонной решеткой. На примере численной верификации и валидации в заглушенной камере АК-2 разработанного метода продемонстрирована возможность объемной локализации звуковых источников с помощью двух последовательных измерений в конфигурации расположений микрофонной решетки типа прямого двугранного угла. Продемонстрирована возможность определения спектральной характеристики локализуемых звуковых источников с хорошей точностью.

Дальнейшее развитие метода предполагается направить на учет в модели звуковых источников мультипольной структуры звукового излучения, а

также адаптацию микрофонных измерений для источников подобного типа.

Разработка обобщенного метода и его верификация выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-71-10064).

Экспериментальная часть работы выполнена на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФГУП “ЦАГИ”, модернизируемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-11-2021-066.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Billingsley J., Kinns R.* The acoustic telescope // *J. Sound Vibr.* 1976. V. 48. P. 485–510.
2. *Michel U.* History of acoustic beamforming // 1<sup>st</sup> Berlin Beamforming Conference. 2006.
3. *Padois T., Robin O., Berry A.* 3D Source localization in a closed wind-tunnel using microphone arrays // In 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2013-2213, 2013.
4. *Sarradj E.* Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations // *Advances in Acoustics and Vibration.* 2012. P. 292695.
5. *Porteous R., Prime Z., Doolan C., Moreau D., Valeau V.* Three-dimensional beamforming of dipolar aeroacoustic sources // *J. Sound Vibr.* 2015. V. 355. P. 117–134.
6. *Zaitsev M., Kopiev V.* Mechanism of sound radiation by turbulence near the rigid body // *Fluid Dynamics.* 2008. V. 43. № 1. P. 98–109.
7. *Liu Y., Quayle A., Dowling A., Sijtsma P.* Beamforming correction for dipole measurement using two-dimensional microphone arrays // *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. V. 124. № 1. P. 182–191.
8. *Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А.* Локализация дипольных источников шума плоскими микрофонными решетками // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 5. С. 675–687.
9. *Porteous R., Prime Z., Valeau V., Doolan C., Moreau D.* Three-dimensional beamforming of aeroacoustic sources // *Proceedings of Internoise 2014, Melbourne, Australia.* 2014.
10. *Ahlefeldt T., Spher C., Berkefeld T., Di Marco A., Burghignoli L.* A tomographic directivity approach to frequency domain beamforming // *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2018–2808,* 2018.
11. *Yu L., Guo Q., Chu N., Wang R.* Achieving 3D Beamforming by Non-Synchronous Microphone Array Measurements // *Sensors.* 2020. V. 20. P. 7308.