

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КАНАЛАХ

Акустические характеристики потока газа (жидкости) в трактах сложной структуры исследовались в работах [1–5]. Акустические частотные характеристики используются при анализе устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания, разработке систем регулирования и управления в энергетических и транспортных установках, выборе параметров демпфирующих устройств для устранения колебаний давления и т. д. Акустические характеристики потока газа (жидкости) в трубопроводных системах зависят как от формы проходных сечений трубопроводов [3, 4], так и от способа соединения трубопроводов [1, 2]. Цель данной работы – исследование акустических характеристик потока, движущегося в каналах, соединенных параллельно. При этом ставились две задачи. Первая – использование каналов, соединенных параллельно, для изменения акустических характеристик системы и, в частности для демпфирования колебаний в системе. Вторая – сопоставление результатов расчета с данными экспериментов.

На рис. 1 представлена схема установки для исследования акустических характеристик потока газа в каналах, соединенных параллельно. Пульсатор приводился в движение гидромотором. Частота вращения вала пульсатора регистрировалась датчиком положения. Среднее давление в объекте исследования составляло $P_K \approx 14 \cdot 10^5$ Па, давление перед решеткой $P_p \approx 30 \cdot 10^5$ Па, средняя температура газа $T_K \approx 280$ К. Пульсации давления регистрировались малоинерционными датчиками давления ДДИ-20. Сигналы с датчиков давления и датчика положения записывались на магнитофон. Обработка результатов экспериментов производилась с использованием следящего фильтра [6]. Колебания давления регистрировались в двух точках (рис. 1, В, С на расстоянии 0,05 м от решетки). Эксперименты проводились как для одиночного канала, так и для каналов, соединенных параллельно (рис. 1). При параллельном соединении канал большего диаметра был прямым, канал меньшего диаметра – плавно изогнутым (в работе [2] показано, что при $L/D \gg 1$, где L и D – длина и диаметр канала, наличие плавного изгиба не влияет на акустические характеристики канала на трех первых резонансах). В месте стыковки канал меньшего диаметра подсоединялся к каналу большего диаметра под прямым углом. При обработке экспериментальных данных определялась частотная характеристика

$$\delta \bar{p}_B / \delta \bar{p}_C, \text{ где } \delta \bar{p}_B = \delta p_B / p_p, \delta \bar{p}_C = \delta p_C / p_K.$$

Расчеты проводились по методике, представленной ранее в работах [1, 2], и основанной на представлении уравнений, описывающих продольные колебания вязкого газа в цилиндрическом канале или местном сопротивлении, в форме уравнений четырехполюсника:

$$\delta G_j(0) = Y_{j11} \delta p_j(0) + Y_{j12} \delta p_j(1), \quad \delta G_j(1) = Y_{j21} \delta p_j(0) + Y_{j22} \delta p_j(1),$$

где $\delta G_j(0)$, $\delta G_j(1)$, $\delta p_j(0)$, $\delta p_j(1)$ – вариации расхода и давления на входе и выходе j -го канала или местного сопротивления; Y_{j11} , Y_{j12} , Y_{j21} , Y_{j22} – коэффициенты (комплексные величины), зависящие от частоты и средних параметров потока (формулы для их вычисления приведены в работе [2]). При этом для цилиндрических участков трактов учитывались распределенные потоки на трение с использованием модели трения для нестационарного ламинарного течения [2]. В месте стыка каналов использовалось уравнение баланса расходов $\sum_{l=1}^N \delta G_l(1) = \sum_{k=1}^M \delta G_k(0)$, где N – число каналов,

по которым газ втекает в место стыка, а M – число каналов, по которым газ вытекает из стыка, а также соотношения $\delta p_l(1) = \delta p_k(0)$, $l = 1, \dots, N$; $k = 1 \dots M$. Потери давления в местах соединения каналов моделировались введением в расчетную схему местных сосредоточенных сопротивлений [2] на входе и выходе каждого канала. Потери давления на местных сосредоточенных сопротивлениях, вычисленные по известной методике [7], составили $\sim 10^4$ Па. Окончательно задача определения частотных характеристик сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно переменных – вариаций давлений [1, 2].

В первой серии экспериментов определялись частотные характеристики потока газа в одиночном основном канале, длина и диаметр которого составляли $L_1 = 1,3$ м, $D_1 = 0,05$ м соответственно и в дальнейшем не менялись. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика $A = |\delta \bar{p}_B / \delta \bar{p}_C|$ для одиночного канала в диапазоне частот $0 \leq f < 250$ Гц, там же приведены результаты расчетов. Как видно из рис. 2, рассматриваемый объект исследования в диапазоне частот $0 \leq f < 250$ Гц имеет два резонанса на частотах 115 и 230 Гц. При этом результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В следующей серии экспериментов определялись амплитудно-частотные характеристики потока газа, движущегося в каналах, соединенных параллельно (рис. 1). При этом к основному каналу присоединялся параллельно другой канал. На рис. 3 представлены экспериментально определенные амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой системы, обозначенные на рис. 3 кружочками, для случая, когда длина второго канала равна $L_2 = 1,95$ м, а диаметр $D_2 = 0,02$ м. Как видно

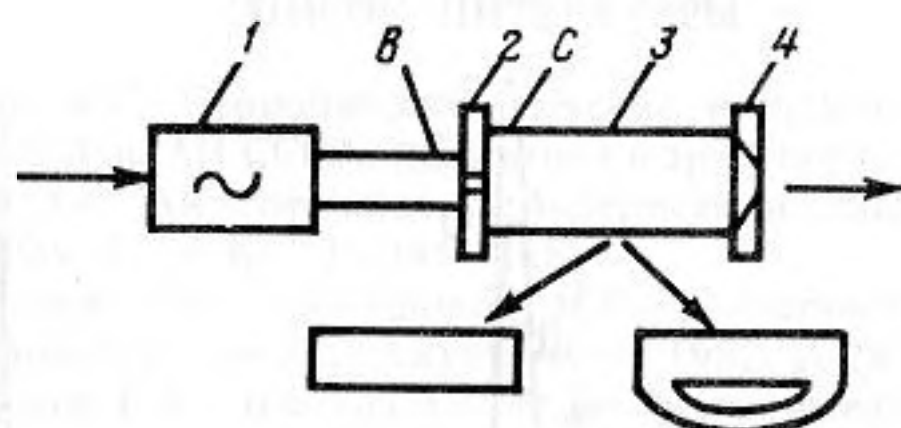


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - пульсатор для создания гармонических возмущений в системе, 2 - решетка со сверхкритическим перепадом давления, 3 - объект исследования (один цилиндрический канал; два цилиндрических канала, соединенных параллельно), 4 - сопло со сверхкритическим перепадом давления; B, C - точки измерений колебаний давления δP_B , δP_C соответственно

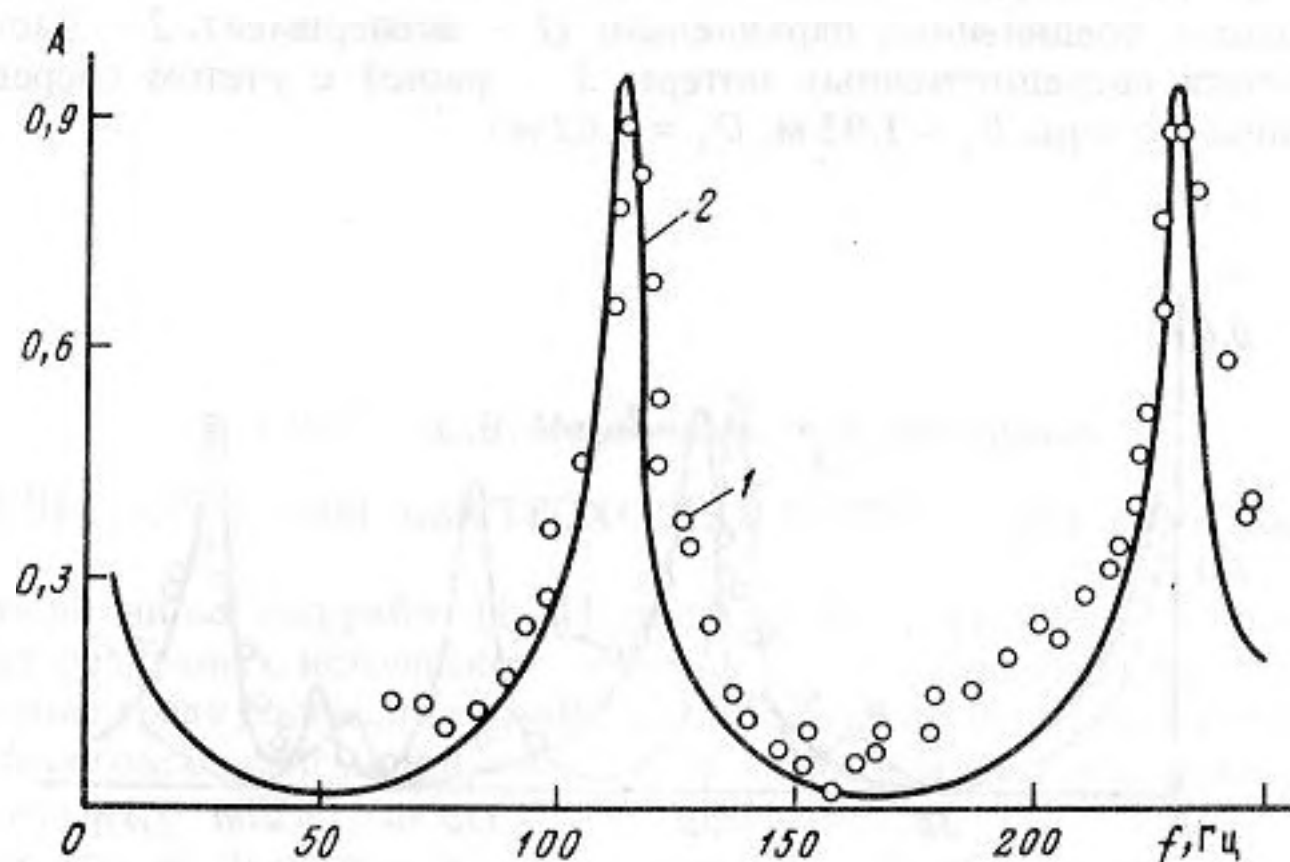


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика газового потока в одиночном канале (1 - эксперимент, 2 - расчет)

из рис. 3, наличие обводного канала меньшего диаметра приводит к тому, что акустические характеристики объекта исследования существенно изменяются. Резонансные частоты $f_1 = 115$ Гц и $f_2 = 230$ Гц смещаются в область более низких частот $f'_1 = 110$ Гц и $f'_2 = 220$ Гц, а величины амплитуд на резонансных максимумах уменьшаются от значений $A_1 = 0,9$, $A_2 = 0,9$ (рис. 2) до значений $A'_1 = 0,6$, $A'_2 = 0,5$ (рис. 3). На том же рис. 3 представлены результаты расчетов (кривые 2, 3). Кривая 2 соответствует случаю, в котором не учитываются сосредоточенные потери в местах соединения каналов (т. е. в расчетной схеме отсутствовали местные сосредоточенные сопротивления на входе и выходе каналов, соединенных параллельно). Кривая 3 получена при условии учета сосредоточенных потерь давления в местах соединения каналов (т. е. в расчетной схеме присутствовали местные сосредоточенные сопротивления на входе и выходе каналов, соединенных параллельно). Как видно из рис. 3, сосредоточенные потери давления оказывают существенное влияние на акустические характеристики объекта исследования и приводят к снижению резонансных максимумов. Кроме того, как видно из рис. 3, в расчетах, проводимых без учета потерь давления в месте соединения каналов (кривая 2), наблюдается небольшой резонанс на частоте ~ 180 Гц, который в экспериментах не проявляется. На расчетной кривой 3, полученной с учетом потерь давления в месте стыка каналов, этот резонанс также проявляется. Однако величина его существенно ниже и не превышает значения экспериментальных данных на данной частоте. Следует заметить, что на резонансных частотах экспериментальные точки лежат ниже теоретических и при увеличении частоты расхождения усиливаются. Так как для одиночной трубы результаты расчетов и экспериментов в целом хорошо согласуются, очевидно, что различия между экспериментальными и теоретическими результатами для параллельно соединенных каналов обусловлены не совсем точным математическим описанием мест соединения каналов. Однако в настоящее время не существует достаточно приемлемой математической модели, описывающей нестационарные процессы в местах, где соединяются несколько каналов.

В третьей серии экспериментов также определялись акустические характеристики потока газа, движущегося в каналах, соединенных параллельно. Но при этом диаметр второго обводного канала

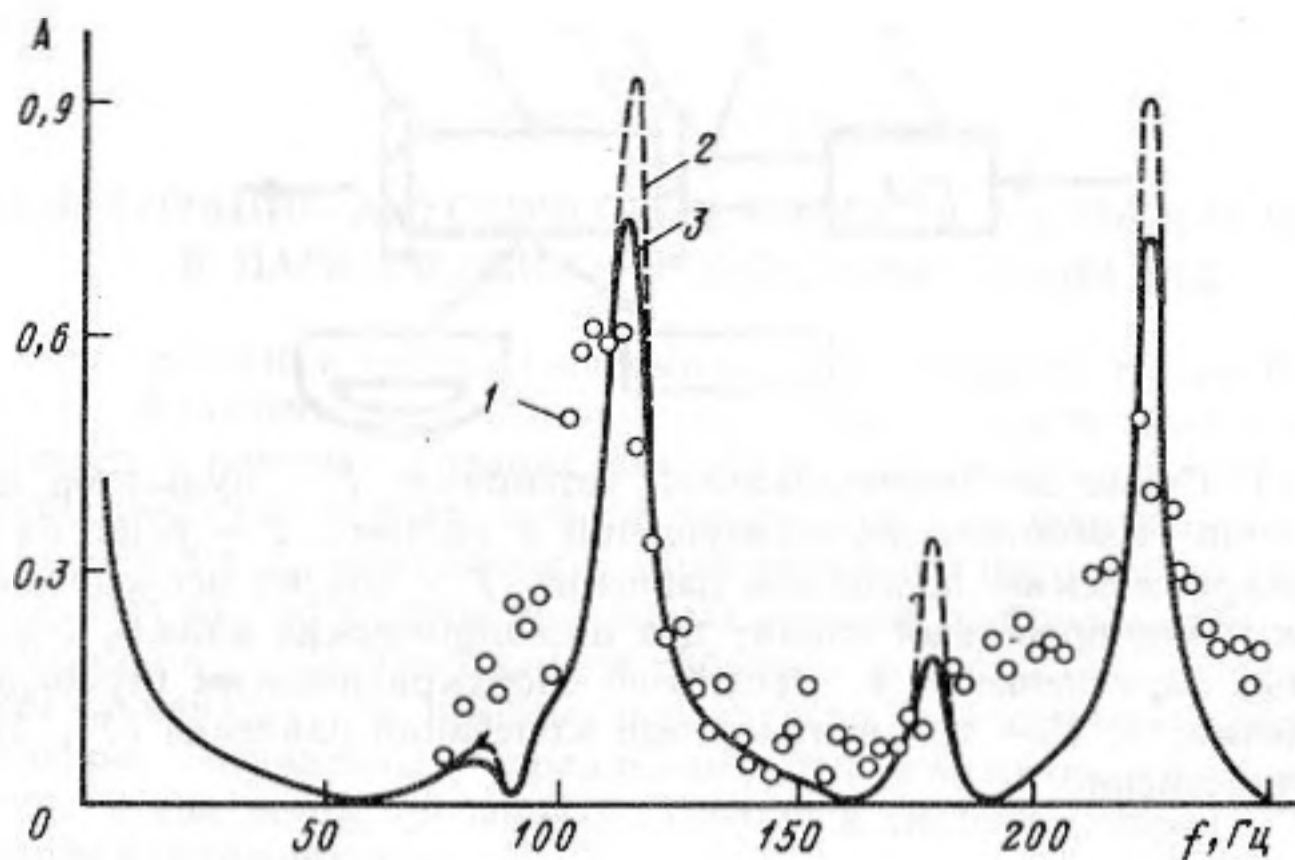


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики газового потока в каналах, соединенных параллельно (1 – эксперимент, 2 – расчет без учета сосредоточенных потерь, 3 – расчет с учетом сосредоточенных потерь, $L_2 = 1,95$ м, $D_2 = 0,02$ м)

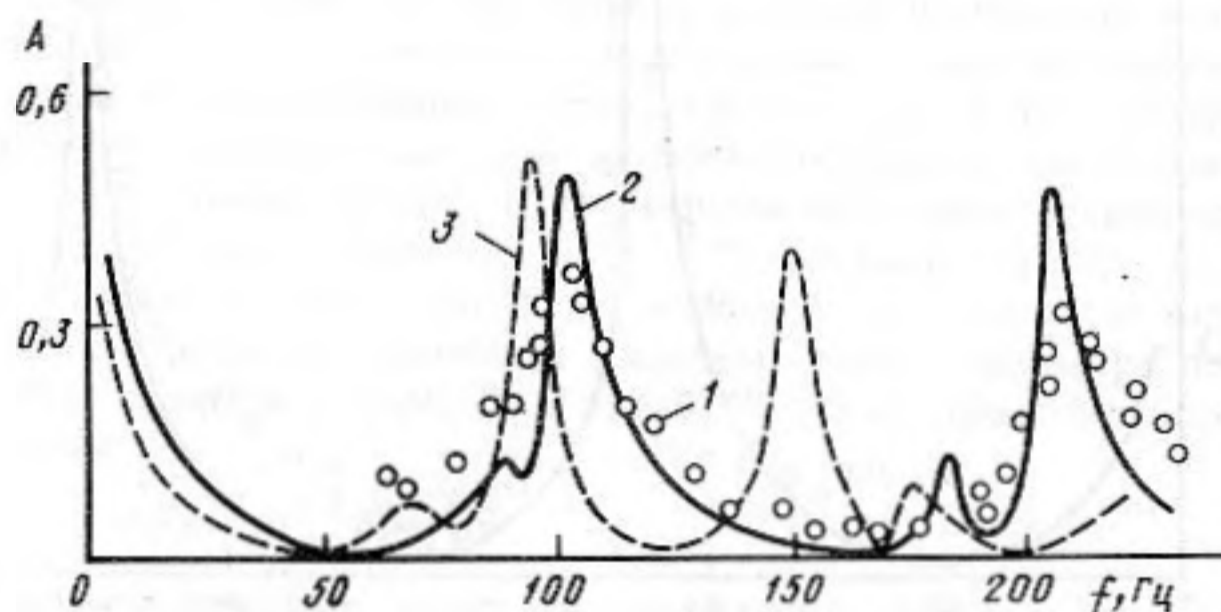


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики газового потока в каналах, соединенных параллельно (1 – эксперимент, 2 – расчет при $L_2 = 1,95$ м, $D_2 = 0,03$ м; 3 – расчет при $L_2 = 2,65$ м, $D_2 = 0,03$ м)

составлял $D_2 = 0,03$ м, длина $L_2 = 1,95$ м. На рис. 4 (кружочки) представлены экспериментально определенные амплитудно-частотные характеристики объекта исследования. Как следует из рис. 3, 4, увеличение диаметра обводного канала приводит к смещению резонансных частот в область более низких частот ($f_1'' \approx 104$ Гц, $f_2'' \approx 208$ Гц) и к уменьшению амплитуды на резонансных максимумах ($A_1'' \approx 0,33$, $A_2'' \approx 0,3$). На том же рис. 4 представлены результаты расчетов (кривая 2), проводимых с учетом потерь давления в местах соединения каналов. Как видно из рис. 4, здесь так же, как и на рис. 3, наблюдается расхождение результатов расчета и эксперимента, связанное с большим, чем в расчетах затуханием амплитуды колебаний на резонансных частотах при экспериментальных исследованиях. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования. Представленные на рис. 3, 4 результаты получены при условии, что длина обводного канала оставалась постоянной, менялся только диаметр. Очевидно, что при изменении длины обводного канала акустические характеристики также будут изменяться. В качестве примера на рис. 4 (кривая 3) представлена амплитудно-частотная характеристика объекта исследования при условии, что длина обводного канала составляет $L_2 = 2,65$ м, диаметр $D_2 = 0,03$ м. Как видно из рис. 4, в этом случае резонансные частоты сместились в область еще более низких частот ($f_1''' \approx 90$ Гц, $f_2''' \approx 150$ Гц вместо $f_1'' \approx 104$ Гц, $f_2'' \approx 208$ Гц). Таким образом, с помощью обводных каналов можно достаточно эффективно изменять акустические свойства системы, а также демпфировать колебания в системе. Сопоставление результатов расчетов с данными экспериментов показывают, что для одиночной трубы результаты расчетов в целом удовлетворительно совпадают с данными экспериментов, а для параллельно соединенных каналов наблюдаются некоторые отличия, очевидно связанные с не совсем точным математическим описанием мест соединения каналов при нестационарных процессах. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гликман Б.Ф., Лосенков А.С. Периодическое течение капельной жидкости в разветвленной трубопроводной системе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1987. № 2. С. 143–148.
2. Гликман Б.Ф., Лосенков А.С. Акустические характеристики газового потока в трактах с поворотами // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 245–248.
3. Лебединский Е.В., Натанзон М.С., Никифоров М.В. Экспериментальный метод определения динамических свойств газовых потоков // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 5. С. 660–664.
4. Лебединский Е.В., Мосолов С.В., Никифоров М.В. Экспериментальное исследование динамических свойств потока в тракте периодической структуры // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1989. № 3. С. 126–134.
5. Неустойчивость горения в ЖРД / Под ред. Д.Т. Харрье, Ф.Г. Рирдона. М.: Мир, 1975. 872 с.
6. Бажанов В.В., Столяров В.Н. Анализатор передаточных функций: А.С. 355603 СССР // Б.И. Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1972. № 31.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 410 с.

Научно-исследовательский
институт тепловых процессов

Поступило в редакцию
16.03.90

УДК 534.6:550.34

© 1992 г. С.В. Меркушин, А.Б. Шемякин

ГЕОАКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ БЫСТРОХОДНОГО СУДНА НА ВОДОХРАНИЛИЩЕ

В последнее время появился ряд работ [1–4], посвященных изучению геоакустических фазовых шумов и сигналов от различных источников, в том числе и от транспортных средств. Цель наших исследований – изучение геоакустических шумов быстроходного судна, движущегося по водохранилищу, с помощью береговых сейсмоприемников. Изучались шумы быстроходных пассажирских судов на подводных крыльях (СПК) типа "Метеор" и "Ракета".

Прием геоакустических волн осуществлялся с помощью серийного трехкомпонентного сейсмоприемника "Черепаша-М" (три взаимно ортогональных велосиметра – два горизонтальных и один вертикальный), установленного на берегу с заглублением в грунт на 0,5 м, в 200 м от оси судового хода. Ось максимальной чувствительности одного из горизонтальных сейсмоприемников (ось X) была ориентирована параллельно оси судового хода.

Спектральный экспресс-анализ геоакустических шумов, проводившийся на спектроанализаторе СК4-72 при неоднократном прохождении СПК вблизи сейсмоприемника, показал, что в спектрах появляются характерные дискретные составляющие в диапазонах частот 65–75, 130–150 Гц и выше. Более подробный спектральный анализ записей геоакустических шумов проводился на двухканальном анализаторе сигналов модели 2034 (фирма Брюль и Кьер) в диапазоне частот 50–100 Гц, где максимальное превышение над шумом появляющихся дискретных составляющих достигало 30 дБ, а сами дискретные составляющие были заметны при удалении СПК до нескольких километров. Было отмечено, что при прохождении СПК вблизи сейсмоприемника происходило плавное понижение на 4–5 Гц частот дискретных составляющих, то есть проявлялся эффект Доплера.

На рисунке представлены взаимные спектры (модуля и фазы) геоакустических шумов горизонтального (X) и вертикального (Z) сейсмоприемников в диапазоне частот 50 ÷ 100 Гц. Масштаб оси частот – линейный. Масштаб по вертикальной оси для модуля – логарифмический, диапазон – 40 дБ, градуировка шкалы в единицах спектральной плотности мощности, верхней границе соответствует значение $4 \cdot 10^{-13}$ (м/с)²/Гц. Масштаб по вертикальной оси для фазы – линейный, градуировка шкалы – в градусах, диапазон – ±200°. Спектры получены в результате экспоненциального усреднения двух реализаций с перекрытием 75%. Два верхних спектра соответствуют приближению СПК к сейсмоприемнику, два нижних – удалению.

Дискретные составляющие шумов СПК на рисунке выделены темным цветом. Отчетливо просматриваются две составляющие, обусловленные наличием двух гребных валов с несколько различающимися частотами вращения. Значения функции когерентности на этих частотах приближаются к единице (0,863 и 0,841), а угол фазового сдвига φ_{xz} между горизонтальной (X) и вертикальной (Z) компонентами составляет около 90°, что характерно для поверхностных геоакустических волн. На спектрах фазы хорошо видно, как при прохождении СПК мимо сейсмоприемника знак φ_{xz} меняется на противоположный вследствие косинусоидальной характеристики направленности сейсмоприемника. Также видно, что абсолютная величина φ_{xz} несколько уменьшается.

По известной скорости движения СПК и величине доплеровского сдвига 70-герцовых дискрет-