*Челябинский физико-математический журнал. 2024. Т. 9, вып. 2. С. 277–286.*

УДК 534.23+628.164 DOI: 10.47475/2500-0101-2024-9-2-277-286

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ РЕЗОНИРУЮЩЕЙ ПОЛОСТИ НА БЛИЖНЕЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СТРУИ В БИКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

**А. В. Примаков**[1,a], **А. А. Жилин**[1,2,b]

[1] *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия*

[2] *Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия*

[a] *primakow@itam.nsc.ru,* [b] *lab20@itam.nsc.ru*

Проводится численное моделирование газового потока в тракте биканальной резонансной системы ИТПМ СО РАН. Численное моделирование нестационарного акустоконвективного потока проведено с помощью программного пакета Ansys Fluent в трёхмерной постановке. В результате моделирования получены газодинамические характеристики течения в центральной части системы, где формируется сверхзвуковая недорасширенная струя. Выполнен анализ распределений давления в ближнем поле первой бочки струи, а также внутри её структуры в условиях биканальной системы. Для исследования выбраны шесть точек в ближнем поле струи. С учётом нестационарности потока в тракте резонансной системы исследуемые точки фиксируют колебания формируемого потока и изменение структуры струи. Проведена оценка спектрального состава вблизи и внутри невозмущённой резонатором струи и представлено сравнение со спектром резонансной системы. Показана возможность влияния на структуру струи и акустические характеристики вблизи струи при помощи резонатора.

**Ключевые слова:** *сверхзвуковая струя, акустоконвективная биканальная система, генератор Гартмана, резонатор, волновые взаимодействия, высокоинтенсивные колебания.*

## Введение

Применение газодинамических источников звука является перспективным во многих областях промышленности, поэтому возникает необходимость исследования принципов, заложенных в их работу [1]. Примером устройства, генерирующего высокоинтенсивный звук, является генератор Гартмана и его модификация — биканальная система (БС), разработанная на базе ИТПМ СО РАН [2]. Системы на основе генераторов Гартмана могут быть полезны в вопросах интенсификации горения [3], смешения течений [4; 5], управления газовыми потоками [6], усиления и ослабления звуковых колебаний [6–9], изменения характеристик материалов [10; 11]. Биканальная система имеет большой потенциал в сфере осушения материалов, что подчёркивается большим количеством работ по этой теме [12–15]. Осушение пористых материалов также имеет применение в различных сферах жизнедеятельности человека: пищевой [16; 17], химической [18], строительной [19–21] и т. д. Помимо

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области № 23-29-10118, https://rscf.ru/project/23-29-10118/.

прикладных направлений, интерес к исследованию биканальных систем возникает в фундаментальной области, поскольку работа газодинамического генератора основана на взаимодействии резонирующей полости (резонатора) и осциллирующего потока (струи) [22–24]. Данная работа посвящена эффектам, возникающим в биканальной системе, и влиянию резонансной полости на структуру струи при генерации высокоинтенсивного звука.

## 1. Физико-математическая постановка задачи

Исследование проведено численно в программном пакете Ansys Fluent в трёхмерной нестационарной постановке. Исследуемая БС (рис. 1) является цифровой копией акустоконвективного сушильного устройства ИТПМ СО РАН [25; 26]. Геометрия модели состоит из пересекающихся под прямым углом каналов: вертикальный канал на рис. 1 — генератор Гартмана; горизонтальный канал — дополнительный резонатор с рабочей частью БС. Характеристики формирующегося газового течения регистрируются в моделировании в точечных мониторах вблизи первой бочки струи: $S_1$–$S_3$ на расстоянии 0.1d; $S_4$–$S_6$ на расстоянии 0.85d от среза сопла; пары $S_1$ и $S_4$, $S_2$ и $S_5$, $S_3$ и $S_6$ удалены от центральной оси системы на 0.25d, 0.40d и 0.55d соответственно.

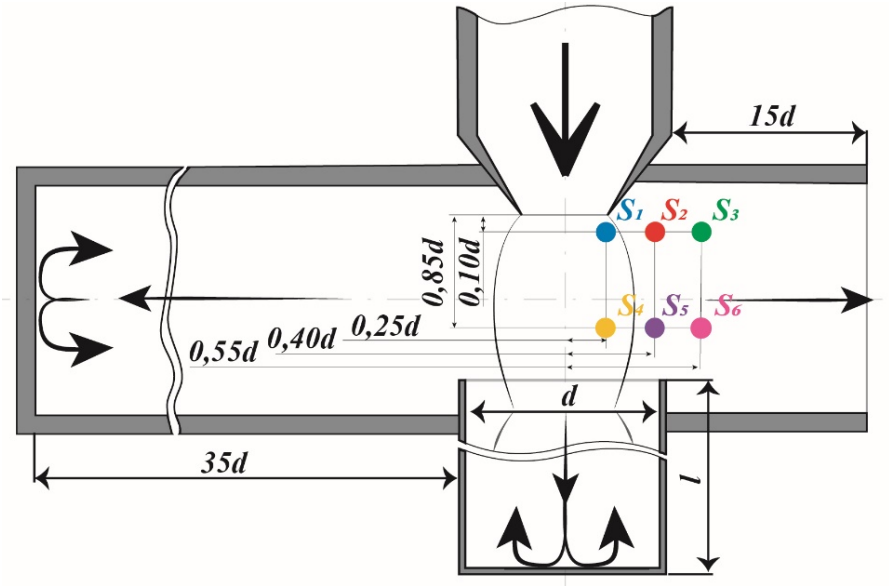


Рис. 1. Схематичное изображение биканальной системы с мониторами $S_1$–$S_6$ вблизи первой бочки струи

В тракте БС начальные условия соответствуют нормальным комнатным: $P = 1$ атм., $T = 20\,^{\circ}\mathrm{C}$, $u = 0$ м/с, а на изотермических стенках системы ($T_w = 20\,^{\circ}\mathrm{C}$) соблюдается условие прилипания газа. С началом моделирования сжатый газ под давлением 6 атм. подаётся из форкамеры в тракт БС, с последующим формированием сверхзвуковой струи.

Анализ полученных характеристик потока в исследовании проводится только по данным, полученным после выхода на рабочий режим колебаний.

Математическое описание газодинамического течения в БС проводится с помощью уравнений Навье — Стокса осреднённых по Фавру, дополненных $k$-$\omega$ $SST$ моделью турбулентности [27]. Данная работа является продолжением серии экспериментально-теоретических исследований биканальных резонирующих систем [25, 28 – 34]. Подробное описание математической модели приведено в работе [34].

## 2. Исследование влияния цилиндрической резонирующей полости на ближнее акустическое поле струи в биканальной системе

Генерация колебаний в свистке Гартмана тесно связана с формирующейся струёй. Рассмотрим колебания, генерируемые в БС в ближнем поле первой бочки струи (рис. 2, а). Распределения давления в рабочем режиме колебаний Гартмана показаны в точках, расположенных в струе и на её границе в слое смешения (рис. 1). Для первого монитора $S_1$ показаны высокочастотные колебания, характерные для струи. Амплитуда колебаний при этом $P = 0.225$. Перемещение монитора по центральной оси системы (из $S_2$ в $S_3$) в радиальном направлении приводит к увеличению амплитуды колебаний до 0.71 и 0.48 в мониторах $S_2$ и $S_3$ соответственно, а также падению частоты до 278 Гц. Такое изменение АЧХ связано с выводом мониторов из бочкообразной структуры в ближнее поле струи, где преобладает акустический сигнал, связанный с резонансным режимом Гартмана. Колебания, генерируемые струёй, в данной точке подавлены и неразличимы в спектре на фоне выше описанных колебаний. Перемещение мониторов ближе к резонатору ($S_4$–$S_6$) приводит к нарастанию амплитуды колебаний, поскольку в этой области происходит истечение из основного резонатора, а мониторы $S_4$–$S_6$ находятся между волноводом и диском Маха струи в зоне повышенного давления при столкновении ответного потока и бочкообразной структуры [27]. Амплитуда колебаний в точках $S_4$, $S_5$ и $S_6$ составила 2.0, 1.4 и 0.93 соответственно. Падение амплитуды в $S_4$–$S_6$ обусловлено выводом этих мониторов из области повышенного давления при столкновении потоков и помещением их в следе струи.

Отдельно следует рассмотреть колебания давления в мониторе $S_1$ при исследовании колебаний струи (рис. 2, б). Анализ ряда колебаний позволяет оценить частоту, характерную для струйного течения [7]. Из распределения колебаний с течением времени видно, что частота колебаний изменяется от 20 до 50 кГц. При этом колебания являются нестабильными, а также в спектре видно влияние основной гармоники волновода (рис. 3, $S_1$) с малой амплитудой.

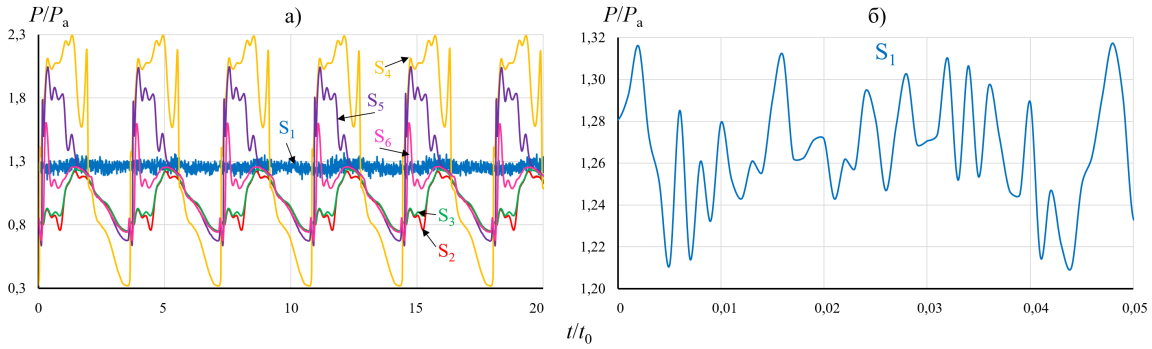


Рис. 2. а) распределение давления с изменением времени в мониторах вблизи струи $S_1$–$S_6$; б) высокочастотные колебания струи в точке $S_1$

Распределение давления вблизи струи представлено на рис. 3 в виде амплитудно-частотного спектра — распределение интенсивности звука по числу Струхаля (St). Сравниваются два спектра: точками обозначен тон, соответствующий колебаниям струи с исключённым сигналом, характерным для резонансного режима БС (сплошные линии). Таким образом, представлен спектр, генерируемый формируемой бочкообразной структурой, а следовательно, фоновый сигнал в течении биканальной системы. Колебания в точках происходят в широком спектре частот от 0 до 0.3 St в $S_1$ (внутри бочки струи) и от 0 до 4 St в $S_2$ (в следе столкновения

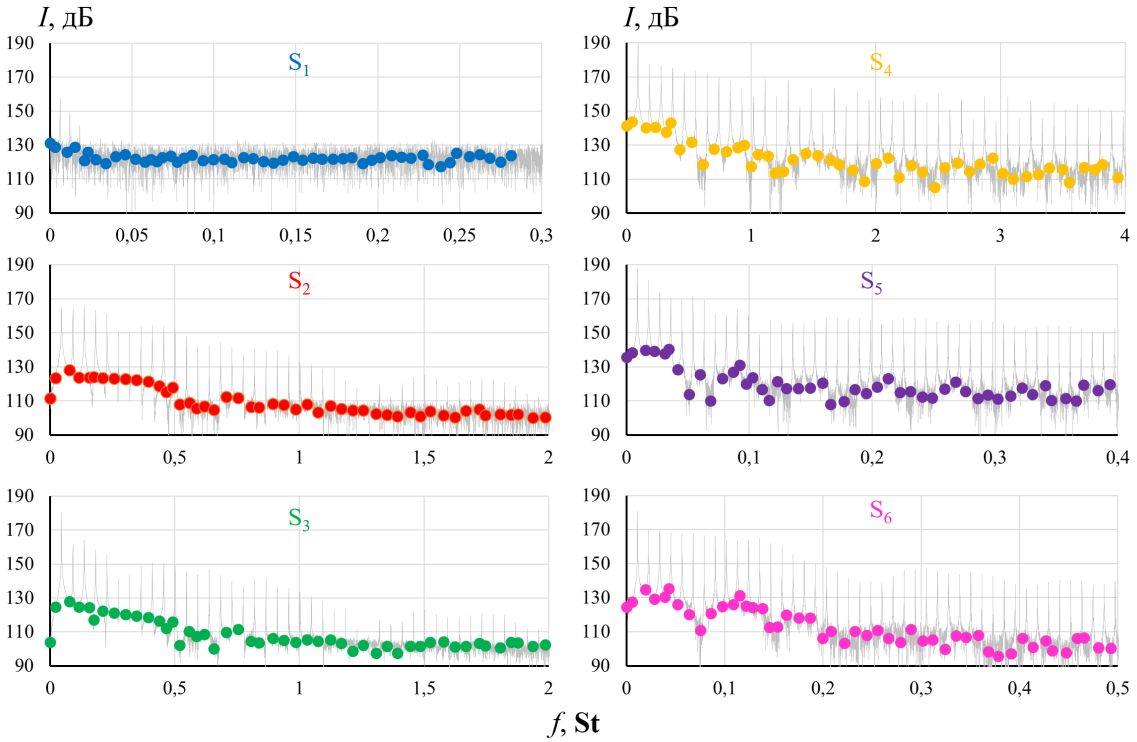


Рис. 3. Спектральный состав сигнала вблизи струи в случае не возмущённой (точки); возмущённой резонансной полостью (линии) струи

струи с ответным потоком). Такой разброс диапазонов числа Струхаля объясняется нестационарным режимом существования струи в БС и разными скоростями в тракте. Колебания в мониторах $S_1$–$S_3$ не превышают 131 дБ. Интенсивность колебаний в области взаимодействия струи $S_4$–$S_6$ с ответным потоком значительно выше и достигает максимума 144 дБ в $S_4$. В распределениях при малых St виден перегиб, характерный для спектрального состава турбулентных течений [28]. Полученные данные в ближнем поле струи без учёта колебаний резонатора возможно качественно сравнить с результатами экспериментального исследования невозмущённой дозвуковой струи [7]. Проводится сравнение сигнала, генерируемого струёй в БС, с сигналом, полученным в результате гартмановского резонанса. Распределения интенсивности от частоты колебаний струи в рассмотренных конфигурациях имеют общие тенденции в реализуемых потоках. В случаях $S_2$–$S_4$ наблюдается перегиб в области St = 0–0.5, а в случае $S_6$ — при St = 0–0.07. Также наблюдаются колебания с низкой интенсивностью до 130 дБ в $S_2$–$S_3$, до 143 дБ в $S_4$–$S_6$. Анализ полученных спектров в сравнении позволяет оценить влияние резонатора на интенсивность сигнала в резонансной системе (до 100 дБ в работе [7]). Внутри бочки $S_1$ наличие резонатора позволяет увеличить интенсивность на 25 дБ в первых трёх наиболее сильных гармониках, но более высокие тона не имеют влияния на спектр в струе. В мониторах $S_2$–$S_6$ прирост интенсивности в первой гармонике за счёт резонатора составил примерно 36 дБ в $S_2$ и 50 дБ в $S_3$–$S_6$. При этом в спектрах (за исключением $S_1$) отчётливо видна гармоничная структура тонов, соблюдающаяся до высоких частотных значений.

## Заключение

В результате численных исследований биканальной системы получена целостная картина течения. Анализ результатов моделирования позволил установить влияние резонансной системы Гартмана на реализуемый амплитудно-частотный состав акустического сигнала. Проведено сравнение тонов, генерируемых невозмущённой

струёй, с тоном БС с резонатором в течении струи. Показана возможность повышения интенсивности колебаний с 130–140 дБ (шум струи) до 170–190 дБ (при наличии резонатора) вблизи струи. Показано влияние акустического поля на колебания внутри бочки струи, что позволяет повысить уровень звукового давления на 36 дБ [1–4].

## Список литературы


1. **Борисов Ю. Г.** Газоструйные излучатели звука гартмановского типа // Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 1 «Источники мощного ультразвука» / под ред. Л. Д. Розенберга. М. : Наука, 1967. С. 7–110.
2. **Глазнев В. Н., Коробейников Ю. Г.** Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний // Приклад. механика и техн. физика. 2001. Т. 42, № 4. С. 62–67.
3. **Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г.** Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер.: Физика. 2014. Т. 9, № 1. С. 79–86.
4. **Narayanan S., Srinivasan K., Sundararajan T.** Atomization in the acoustic field of a Hartmann whistle // International Journal of Spray and Combustion Dynamics. 2013. Vol. 5, no. 1. P. 1–24.
5. **Школьникова Р. Ш.** Воздухоструйные генераторы акустических колебаний для коагуляции аэрозолей // Акустический журнал. 1963. Т. 9, № 3. С. 368–375.
6. **Raman G., Kibens V.** Active flow control using integrated powered resonance tube actuators // AIAA paper. 2001. Vol. 3024. P. 19.
7. **Копьев В. Ф., Бычков О. П., Копьев В. А., Фараносов Г. А., Моралев И. А., Казанский П. Н.** Активное управление шумом взаимодействия струи и крыла с помощью плазменных актуаторов в узкой полосе частот // Акустич. журн. 2023. Т. 69, № 2. С. 177–190.
8. **Gubaidullin D. A., Fadeev S. A., Shaidullin L. R.** Effect of the cone-shaped end vertex angle of a closed tube on resonant gas oscillations // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. Vol. 44, no. 5. P. 1629–1633.
9. **Raman G., Kibens V., Cain A., Lepicovsky J.** Advanced actuator concepts for active aeroacoustic control // 6th Aeroacoustics Conference and Exhibit. 2000. Vol. 1930. P. 1–23.
10. **Коваленко В. Ф., Глазкова В. В.** Влияние акустических волн на структурные свойства воды // Биомед. инженерия и электроника. 2013. № 1 (3). С. 2–14.
11. **Zhilin A. A.** Properties of water under intense acoustic loading // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2504. P. 030115.
12. **Глазнев В. Н., Коробейников Ю. Г., Фомин В. М.** Акустическая сушка пористых материалов // Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. С. 212–239.
13. **Коробейников Ю. Г., Трубачеев Г. В., Федоров А. В., Чу К. М., Жеонг Д. М., Ким Ю. И.** Экспериментальное исследование акустоконвективной сушки неошелушённого корейского риса // Инж.-физ. журн. 2008. Т. 81, № 4. С. 676–679.
14. **Федоров А. В., Федорченко И. А., Ан С. Б.** Физическое и математическое моделирование акусто-конвективной сушки риса // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83, № 1. С. 64–73.
15. **Коробейников Ю. Г., Назаров А. А., Федоров А. В.** Энергозатраты при сушке древесины акустическим способом // Деревообрабат. промышленность. 2004. № 4. С. 6–7.

16. **Жилин А. А., Федоров А. В.** Исследование акустоконвективной сушки мяса // Инж.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 2. С. 916–925.

17. **Жилин А. А., Федоров А. В.** Акусто-конвективная сушка кедрового ореха // Инж.-физ. журн. 2014. Т. 87, № 4. С. 908–916.

18. **Федоров А. В., Жилин А. А., Коробейников Ю. Г.** Исследование процессов пропитки и сушки зернистого силикагеля // Инж.-физ. журн. 2011. Т. 84, № 5. С. 965–974.

19. **Жилин А. А., Федоров А. В.** Акусто-конвективная сушка ячеистого газобетона // Инж.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 6. С. 1483–1498.

20. **Zhilin A. A.** Dynamics of drying of fibrous material by the acoustic-convective method // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404, no. 1. P. 012104.

21. **Zhilin A. A.** Acoustic-convective drying of coniferous sawdust // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125. P. 030085.

22. **Глазнев В. Н., Запрягаев В. И., Усков В. Н., Терехова Н. М., Ерофеев В. К., Григорьев В. В., Кожемякин А. О., Котенок В. А., Омельченко А. В.** Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000.

23. **Глазнев В. Н.** О механизме обратной связи в автоколебаниях при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // Приклад. механика и техн. физика. 1991. № 4. С. 59–63.

24. **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 // Акустич. журн. 2019. Т. 65, № 1. С. 59–73.

25. **Primakov A. V., Zhilin A. A.** Studying of the resonator depth influence on amplitude-frequency characteristics operating flow in the two-channel system // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404. P. 012096.

26. **Zhilin A. A., Golubev E. A.** Experimental study of the amplitude-frequency characteristics in a two-channel system // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1939. P. 020016.

27. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, no. 8. P. 1598–1605.

28. **Borisov A. V., Fedorova N. N.** Calculation of turbulent detached flows on the basis of the method of higher-order approximation // Thermophysics and Aeromechanics. 1995. Vol. 2, no. 3. P. 253–269.

29. **Федорченко И. А., Федоров А. В.** Математическое моделирование акустических и газодинамических процессов в канале установки акусто-конвективной сушки // Инж.-физ. журн. 2013. Т. 86, № 4. С. 685–688.

30. **Kravchenko A. S., Zhilin A. A.** Mathematical modeling of the generation of acoustic waves in a two-channel system // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1268. P. 012037.

31. **Primakov A. V., Zhilin A. A.** Gas-dynamic studying of the two-channel system flow using numerical simulation methods // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2288. P. 030060.

32. **Жилин А. А., Примаков А. В.** Численное исследование тепловых эффектов в акусто-конвективном потоке биканальной системы // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 1. С. 79–89.

33. **Primakov A. V., Zhilin A. A.** Effect of resonant cavity edge thickness on flow acoustic-convective characteristics in the multi-channel tract // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2504. P. 030101.

34. **Примаков А. В., Жилин А. А.** Численное исследование влияния геометрии биканальной системы на область существования эффекта Гартманна // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 427–440.

35. **Arndt R. E. A., Long D. F., Glauser M. N.** The proper orthogonal decomposition of pressure fluctuations surrounding a turbulent jet // Journal of Fluid Mechanics. 1997. Vol. 340. P. 1–33.

*Поступила в редакцию 11.12.2023.*
*После переработки 31.03.2024.*

**Сведения об авторах**

**Примаков Антон Вадимович**, инженер-исследователь, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия; e-mail: primakow@itam.nsc.ru.

**Жилин Александр Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН; доцент кафедры информационных систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия; e-mail: lab20@itam.nsc.ru.

*Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2024. Vol. 9, iss. 2. P. 277–286.*

DOI: 10.47475/2500-0101-2024-9-2-277-286

# INVESTIGATION OF THE CYLINDRICAL RESONATING CAVITY EFFECT ON A JET'S NEAR ACOUSTIC FIELD IN THE TWO-CHANNEL SYSTEM

**A.V. Primakov**[1,a], **A.A. Zhilin**[1,2,b]

[1] *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2] *Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*
[a] *primakow@mail.itam.nsc.ru,* [b] *lab20@mail.itam.nsc.ru*

Numerical gas flow modeling in the two-channel resonance system path of ITAM SB RAS is carried out. Numerical simulation of a nonstationary acoustic-convective flow was carried out using the Ansys Fluent software package in a three-dimensional formulation. As a result of the simulation, the gas-dynamic characteristics of the flow in the system central part, where a supersonic under-expanded jet is formed, are obtained. The analysis of pressure distributions in the first barrel of the jet near field, as well as inside its structure under the conditions of a two-channel system, is carried out. Six points in the near field of the jet were selected for the study. Taking into account the unsteadiness of the flow in the resonant system path, the studied points record the fluctuations of the formed flow and the change in the jet structure. The spectral composition is estimated near and inside the jet undisturbed by the resonator and a comparison with the spectrum of the resonant system is presented. The possibility of influencing the jet structure and acoustic characteristics near the jet using a resonator is shown.

**Keywords:** *supersonic jet, acousto-convective two-channe system, Hartmann generator, resonator, wave interaction, high-intensity oscillations.*

## References

1. **Borisov Yu.G.** Gazostruynye izluchateli zvuka gartmanovskogo tipa [Gas-jet sound emitters of Hartmann type]. In: Physics and Technology of Powerful Ultrasound; ed. by L. D. Rozenberg; book 1. Moscow, Nauka Publ., 1967. Pp. 7–110. (In Russ.).
2. **Glaznev V.N., Korobeinikov Yu.G.** Hartmann effect. Region of existence and oscillation frequencies. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 4, pp. 616–620.
3. **Kozlov V.V., Grek G.R, Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G.** Osobennosti goreniya vodoroda v krugloy i ploskoy mikrostruye v poperechnom akusticheskom pole i ikh sravneniye s rezul'tatami goreniya propana v tekh zhe usloviyakh [Features of hydrogen combustion in a round and flat microjet in a transverse acoustic field and their comparison with the results of propane combustion under the same conditions]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika* [Bulletin of Novosibirsk State University. Ser. Physics], 2014, vol. 9, no. 1, pp. 79–86. (In Russ.).
4. **Narayanan S., Srinivasan K., Sundararajan T.** Atomization in the acoustic field of a Hartmann whistle. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 1–24.
5. **Shkol'nikova R.Sh.** Vozdukhostruynye generatory akusticheskikh kolebaniy dlya koagulyatsii aerozoley [Acoustic air-jet generators used for aerosol coagulation]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical journal], 1963, vol. 9, no. 3, pp. 368. (In Russ.).

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region no. 23-29-10118, https://rscf.ru/project/23-29-10118 /.

6. **Raman G., Kibens V.** Active flow control using integrated powered resonance tube actuators. *AIAA paper*, 2001, vol. 3024, p. 19.
7. **Kopiev V.F., Bychkov O.P., Kopiev V.A., Faranosov G.A., Moralev I.A., Kazansky P.N.** Active control of jet–wing interaction noise using plasma actuators in a narrow frequency band. *Acoustical Physics*, 2023, vol. 69, pp. 193–205.
8. **Gubaidullin D.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R.** Effect of the cone-shaped end vertex angle of a closed tube on resonant gas oscillations. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023, vol. 44. no. 5, pp. 1629–1633.
9. **Raman G., Kibens V., Cain A., Lepicovsky J.** Advanced actuator concepts for active aeroacoustic control. *6th Aeroacoustics Conference and Exhibit*, 2000, vol. 1930, pp. 1–23.
10. **Kovalenko V.F., Glazkova V.V.** Vliyanie akusticheskikh voln na strukturnye svoystva vody [The influence of acoustic waves on the structural properties of water]. *Biomeditsinskaya inzheneriya i elektronika* [Biomedical engineering and electronics], 2013, no. 1 (3), pp. 2–14. (In Russ.).
11. **Zhilin A.A.** Properties of water under intense acoustic loading. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2504, p. 030115.
12. **Glaznev V.N., Korobeinikov Yu.G., Fomin V.M.** Akusticheskaya sushka poristykh materialov [Acoustic drying of porous materials]. *Sovremennye podkhody k issledovaniyu i opisaniyu protsessov sushki poristykh tel* [Modern approaches to the study and description of drying processes of porous bodies]. Novosibirsk, SB RAS, 2001. P. 212–239. (In Russ.).
13. **Korobeinikov Yu.G., Trubacheev G.V., Fedorov A.V., Chu K.M., Zheong D.M.,Kim Yu.I.** Experimental investigation of the acoustic-convective drying of unhusked Korean rice. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, pp. 676–679.
14. **Fedorov A.V., Fedorchenko I.A., An S.B.** Physical and mathematical modeling of acousto-convective drying of rice. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, pp. 72–82.
15. **Korobeinikov Yu.G., Nazarov A.A., Fedorov A.V.** Energozatraty pri sushke drevesiny akusticheskim sposobom [Energy consumption during acoustic drying of wood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2004, no. 4, pp. 6–7. (In Russ.).
16. **Zhilin A.A., Fedorov A.V.** Acoustoconvection drying of meat. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, pp. 323–333.
17. **Zhilin A.A., Fedorov A.V.** Acousto-convective drying of pine nuts. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, pp. 908–916.
18. **Fedorov A.V., Zhilin A.A., Korobeinikov Yu.G.** Investigation of the processes of impregnation and drying of granular silica gel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, pp. 965–974.
19. **Zhilin A.A., Fedorov A.V.** Acoustoconvective drying of cellular gas concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, pp. 1412–1426.
20. **Zhilin A.A.** Dynamics of drying of fibrous material by the acoustic-convective method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1404, no. 1, p. 012104.
21. **Zhilin A.A.** Acoustic-convective drying of coniferous sawdust. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, p. 030085.
22. **Glaznev V.N., Zapryagaev V.I., Uskov V.N., Terekhova N.M., Erofeev V.K., Grigor'ev V.V., Kozhemjakin A.O., Kotenok V.A., Omel'chenko A.V.** *Struynye i nestatsionarnye techeniya v gazovoy dinamike* [Jet and non-stationary sounds in gas dynamics]. Novosibirsk, SB RAS, 2000.
23. **Glaznev V.N.** Inverse feedback mechanism in self-oscillations in flow of an underexpanded supersonic jet against a planar obstacle. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physic*, 1991, vol. 32, pp. 519–522.

24. **Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Yakovets M.A., Ipatov M.S., Kruglyaeva A.E., Sidorov S.Y.** Radiation of sound from the open end of a duct simulating an air inlet under static conditions and in a flow. *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 1, pp. 76–89.
25. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Studying of the resonator depth influence on amplitude-frequency characteristics operating flow in the two-channel System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1404, p. 012096.
26. **Zhilin A.A., Golubev E.A.** Experimental study of the amplitude-frequency characteristics in a two-channel system. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1939, p. 020016.
27. **Menter F.R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
28. **Borisov A.V., Fedorova N.N.** Calculation of turbulent detached flows on the basis of the method of higher-order approximation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 1995, vol. 2, no. 3, pp. 253–269.
29. **Fedorchenko I.A., Fedorov A.V.** Mathematical simulation of acoustic and gas-dynamical processes in the channel of an acoustoconvective dryer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 685–688.
30. **Kravchenko A.S., Zhilin A.A.** Mathematical modeling of the generation of acoustic waves in a two-channel system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1268, p. 012037.
31. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Gas-dynamic studying of the two-channel system flow using numerical simulation methods. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2288, p. 030060.
32. **Zhilin A.A., Primakov A.V.** Numerical study of thermal effects in an acoustic-convective flow in a two-channel system. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 77–86.
33. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Effect of resonant cavity edge thickness on flow acoustic-convective characteristics in the multi-channel tract. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2504, p. 030101.
34. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Numerical study of the influence of bichannel-system geometry on the existence domain of hartmann effect. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 427–440.
35. **Arndt R.E.A., Long D.F., Glauser M.N.** The proper orthogonal decomposition of pressure fluctuations surrounding a turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, vol. 340, pp. 1–33.

*Article received 11.12.2023.*
*Corrections received 31.03.2024.*