

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ  
АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ  
ГРУПП КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ**

Зинченко А.В. к.ф.-м.н., Мирный С.С., Полевой О. Б. к.ф.-м.н.

*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Украина*

**Abstract.** Questions of numerical simulation of acoustic oscillations generation modes in the liquid flow around the groups of two and three circular cylinders are considered. Simulation of such kind of acoustic processes is one of the actual problems of theoretical and applied fluid mechanics and under certain assumptions could be reduced to the flow around a group of bodies. Two approaches for numerical simulation of the acoustic oscillations generation induced by the flow around circular cylinders based on numerical solution of the Navier-Stokes equations for compressible and incompressible flows closed by differential model of turbulence and complemented by acoustic analogy equations have been developed. For laminar flows, eight different modes that fundamentally differ both in the flow structure and in the frequency spectrum of parameter oscillations have been identified. For turbulent flows, the classification criteria for the three main frequency modes are presented.

**Ключевые слова:** ГИДРОДИНАМИКА, АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, УРАВНЕНИЯ НАВЬЕ-СТОКСА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

**Введение.** Задачи исследования акустических процессов возникают как при обтекании крупных объектов типа линий электропередач, городской застройки с многоэтажными домами, так и на уровне мелких твердых частиц и пузырьков газа движущихся в потоке жидкости. Возникающие пульсации давления могут носить как периодический, так и стохастический характер. Генерируемые акустические поля, общий уровень акустической нагрузки трудно поддаются даже априорной оценке.

С практической точки зрения интерес к данной задаче обусловлен тем, что меняя размеры обтекаемых цилиндров, расстояние между ними, угол расположения относительно набегающего потока, можно добиться генерации акустических колебаний нужной интенсивности и направления. Исследование режимов генерации акустических колебаний при обтекании

поток воздуха групп тел будет способствовать развитию новых методов виброакустической диагностики.

**Основной материал.** Для численного моделирования генерации акустических колебаний при обтекании круговых цилиндров разработано два подхода, основанных на решении уравнений Навье-Стокса для сжимаемых и несжимаемых течений, замкнутых дифференциальными моделями турбулентной вязкости и дополненными уравнениями акустической аналогии [1-4]. Выполнены верификационные тесты для разработанных методик в сравнении с экспериментальными данными других авторов [5]. Акустические данные были получены как на основе технологии прямого вычисления шумов (DNC – Direct Noise Computation), так и с привлечением акустических аналогий [6].

Проведены вычислительные эксперименты по определению акустических колебаний при обтекании потоком воздуха групп тел, состоящих из двух и трех круговых цилиндров. Для тандема цилиндров первый цилиндр располагался в начале координат. Положение второго цилиндра задавалось зазором между цилиндрами  $h$ , а также углом  $\theta$  между направлением набегающего потока и прямой, соединяющих центры цилиндров. При проведении вычислительных экспериментов для группы из трех цилиндров цилиндры располагались в вершинах равностороннего треугольника с различными значениями зазора  $h$  между цилиндрами и угла  $\theta$  относительно невозмущенного течения.

Течение вокруг цилиндров имеет сложную структуру. Отрыв потока происходит со всех цилиндров и таким образом в формировании вихревой дорожки за системой участвуют все тела. Результаты численных экспериментов представлены пространственными распределениями модуля вектора скорости, мгновенного акустического давления и кинетической энергии турбулентности.

С помощью быстрого преобразования Фурье определялось количество частот, значение чисел Струхала, амплитуды колебаний аэродинамических коэффициентов. По значению максимальных амплитуд можно определить фазы формирования вихрей и отрыва потока. Сформулированы классификационные признаки, позволяющие идентифицировать различные режимы обтекания и генерации акустических шумов.

В рамках ламинарных течений выявлено восемь различных режимов, принципиально различающихся как по структуре течения, так и по частотному

спектру колебаний интегральных параметров. При моделировании турбулентного течения выделены три основных частотных режима.

В ходе расчетов наблюдалось значительное взаимное влияние цилиндров в группе на их аэродинамические коэффициенты и амплитудно-частотные характеристики. Максимальные амплитуды колебаний коэффициентов и соответствующие частоты значительно отличаются от амплитуды и частоты колебаний аэродинамических коэффициентов одиночного цилиндра. В общем случае эта зависимости представляют собой фигуры Лиссажу сложной формы.

**Выводы.** Для численного моделирования генерации акустических колебаний при обтекании круговых цилиндров разработано два подхода, основанных на решении уравнений Навье-Стокса для сжимаемых и несжимаемых течений, замкнутых дифференциальными моделями турбулентной вязкости и дополненными уравнениями акустической аналогии. Проведены вычислительные эксперименты по определению акустических колебаний при обтекании потоком воздуха групп тел, состоящих из двух и трех круговых цилиндров. Сформулированы классификационные признаки, позволяющие идентифицировать различные режимы обтекания и генерации акустических шумов.

### References

1. Pylypenko A.O., Polevoy O.B., Prykhodko O.A. Numerical simulation of Mach number and angle of attack influence on regimes of transonic turbulent flows over airfoils. *TsAGI Science Journal*. 2012. Vol. 43, No 1. P. 1–36.
2. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. *AIAA Paper*. 1992. No. 112. 28 p.
3. Mirny S.S., Redchyts D.O. Numerical simulation of the viscous incompressible flow around of the group of two bodies. *System technologies*. 2019. No. 3(122). P. 117 – 132.
4. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605.
5. Revell J.D., Prydz R.A., Hays A.P. Experimental study of aerodynamic noise vs drag relationships for circular cylinders. *AIAA Paper*. 1977. No. 1292. 12 p.
6. *Curle N. The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1955. Vol. 231. No.1187. P. 505–510.*