РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ОБТЕКАНИЕМ ТЕЛА ЖИДКОЙ СРЕДОЙ

А.Б. Майзель, **К.Н. Пялов**, Р.В. Слуцкий
АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, Россия,
kir-pyalov@yandex.ru

Расчет шумоизлучения, обусловленного обтеканием объектов, находящихся в жидкой среде, является комплексной задачей гидродинамики и акустики. Используемая в настоящее время методология определения акустических характеристик таких объектов построена на проведении испытаний с использованием физических моделей небольшого масштаба, что не позволяет с требуемой точностью определять акустические параметры исследуемых объектов в силу малого размера модели. Использование крупномасштабных моделей позволило бы избавиться от влияния масштабного эффекта, однако стоимость таких испытаний крайне велика. Методы математического моделирования гидродинамических и акустических процессов позволяют производить расчеты необходимых характеристик объектов на ранних стадиях проектирования и корректировать техническую документацию с меньшими временными затратами по сравнению с физическим моделированием.

Вопросы определения шумоизлучения объектов в аэроакустике рассмотрены довольно широко. Например, в работе [1] рассмотрены задачи определения характеристик аэродинамического шума, вызванного двумерным гармоническим источником звука, обтеканием цилиндров различного сечения, а также крылового профиля. Приведенные задачи решались для случаев обтекания, характеризуемого различными числами Рейнольдса, как докритическими, так и закритическими. В работе [2] рассматривается задача расчета шумоизлучения, вызванного обтеканием фюзеляжа самолета с каверной. В данной работе для расчета шумоизлучения также использовалась интегральная аналогия Фокса-Вильямса и Хокингса.

В настоящей работе рассмотрена двумерная задача расчета шумоизлучения, вызванного обтеканием жидкостью бесконечного абсолютно твердого цилиндра круглого сечения. Рассмотрены два

варианта расположения источников шума: на твердой поверхности цилиндра и на проницаемой поверхности, окружающей цилиндр. Приведено сравнение результатов расчетов для сжимаемой и несжимаемой постановок гидродинамической части задачи обтекания тела. На рисунке 1 приведена расчетная область задачи, где D – диаметр цилиндра, Rs – радиус проницаемой поверхности. Четыре приемника шума расположены на расстоянии L от цилиндра и углах $\vartheta = 0°, 90°, 180°, 270°$.

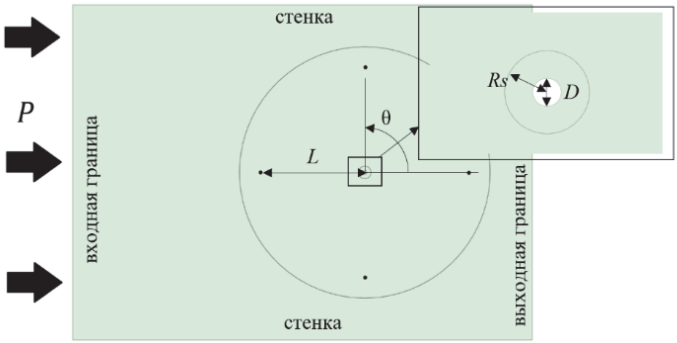


Рис. 1. Расчетная область задачи

На входной границе задано условие избыточного давления $P = \rho V^2/2$, где ρ – плотность жидкости (для воды $\rho = 998{,}5$ кг/м^3), V - скорость набегающего потока. В данной задаче V принято равной 5 м/с, поэтому давление на входе было задано равным 12477 Па. На выходной границе задано условие нулевого избыточного давления. Также на входной и выходной границах задано условие полного поглощения. Данное граничное условие реализуется путем решения на границах уравнения Эйлера.

Боковые границы расчетной области считаются твердыми стенками.

Число Рейнольдса в рассматриваемой задаче $\mathrm{Re} = VD/\nu = 5{\cdot}10^5$. Шаг по времени был равен 10^{-6} с.

Для моделирования в задаче гидродинамики сжимаемости жидкой среды в программе Ansys Fluent используется уравнение Тейта. Указанное уравнение в упрощенной форме может быть представлено в следующем виде:

$$(\rho/\rho_0)^n = K/K_0;\ K = K_0 + n\Delta p\ ;\ \Delta p = p\ -\ p_0 \qquad (1)$$

где p_0 – относительное давление в жидкости, ρ_0 – относительная плотность жидкости (плотность при давлении p_0), K_0 – модуль упругости среды при давлении p_0, n – нелинейный параметр (показатель адиабаты), p – давление в жидкости, ρ – плотность жидкости, K – модуль упругости среды.

Задача решалась в программном пакете Ansys Fluent в нестационарной постановке с применением вихреразрешающего подхода Stress-Blended Eddy Simulation (SBES) и интегральной аналогии Фокса-Вильямса и Хокингса [3]. Размеры расчетной сетки были выбраны таким образом, чтобы удовлетворять неравенству $CFL \leq 1$.

На рисунках 2,а и 2,б приведено сопоставление полей распределения давления для несжимаемой и сжимаемой постановок гидродинамической задачи. Видно, что поля качественно отличаются друг от друга.

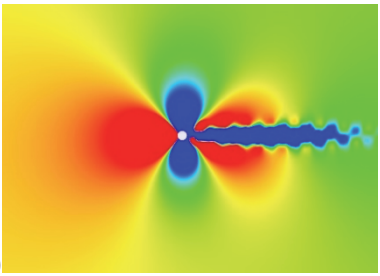
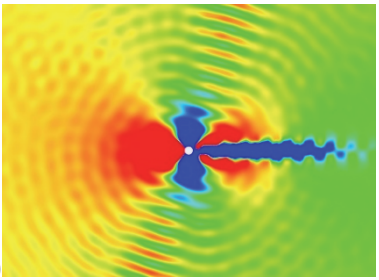
а)  б) 

Рис. 2. Поля распределения давления:
а – несжимаемая постановка; б – сжимаемая постановка

На рисунке 3 приведено сравнение спектров шумоизлучения для сжимаемого и несжимаемого течений в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц в точке $\vartheta = 0^{\circ}$. Видно, что на частотах срыва вихря амплитуды давления близки, тогда как во всем остальном диапазоне частот уровни шумоизлучения для задачи с несжимаемым течением значительно отличаются от аналогичных уровней для задачи сжимаемого течения. Из этого можно сделать вывод, что учет сжимаемости жидкости посредством решения уравнения Тейта в среде Ansys Fluent обязателен для корректного определения сплошной составляющей шумоизлучения.

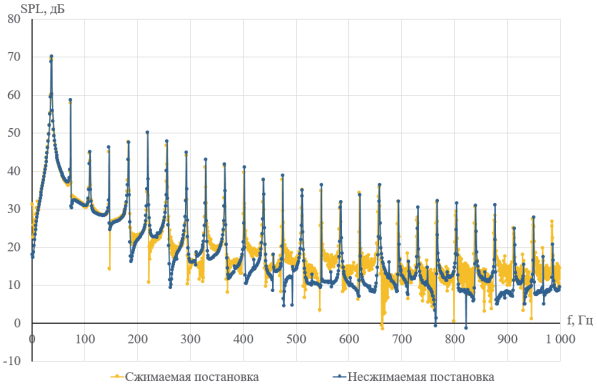


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика уровней звукового давления в точке расположения приемника шума $\vartheta = 0°$

Данная работа является первым этапом рассмотрения влияния сжимаемости жидкости на результат расчета гидродинамического шума, вызванного обтеканием объектов жидкостью при закритических числах Рейнольдса, с применением интегральных подходов расчета шумоизлучения. На следующих этапах предполагается переход к решению задачи в трехмерной постановке.

Литература

1. Полякова Н.С. Оценка точности методов расчета аэродинамического шума с использованием пакета Ansys Fluent, СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2012.
2. Spalart P.R. On the identification of solid sound sources via the Ffowcs Williams-Hawkings integral. Computational Experiment in Aeroacoustics. CEAA2018: 5th International Workshop, Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia, September 19-22, 2018: Book of abstracts. – Moscow: Keldysh Institute, 2018. – 134 p. ISBN 978-5-98354-044-6
3. Ffowcs-Williams J.E. and Hawkings D.L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Proc. Roy. Soc. London. A264. 321–342. 1969.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М: Наука, 1974.
5. www.sciencedirect.com/topics/engineering/strouhal-number