

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЗИГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

И.И. Бут^{1,2}, А.С. Епихин^{1,2}

¹Институт системного программирования РАН, Москва

²Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,
Москва

Исследование уровня шума от струйных течений разных газов по-прежнему остаётся важной и актуальной задачей. В данной работе проведено численное моделирование и выявлены особенности структур истечения воздуха, водорода и аргона распространяющихся в пространство, затопленное воздухом при значениях параметров числа Маха $M = 2.1$ и числа Рейнольдса $Re = 70000$ [1]. Численное моделирование проводится с использованием решателя `reactingQGDFoam` [2] на базе регуляризованных уравнений газовой динамики [3] реализованного в открытом пакете `OpenFOAM`. Для оценки акустических характеристик исследуемых струй используется интегральная аналогия Фокса Вильямса-Хокинса [4], которая реализована в библиотеке `libAcoustics` [5, 6].

Рассматривается задача об истечении из круглого сопла диаметром $d = 0.01$ м свободных, идеально расширенных струй воздуха, водорода и аргона в пространство, затопленное воздухом. Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед, в котором выходная граница удалена на $100d$, боковые - на $20d$, где d – диаметр среза сопла. Входная граница соответствовала срезу круглого сопла и совпадает с началом координат. Дополнительно выполнено сгущение расчетной сетки на $30d$ вниз по потоку (рис. 1).

Исходя из рекомендаций, представленных в работах [7, 8], в области измельчения использовалась расчетная сетка с разрешением 32 ячейки на диаметр сопла. Расчетная сетка содержит порядка 30 млн. Виртуальные микрофоны располагались на расстоянии $R = 40d$, угол положения микрофонов θ задавался от 15 до 90 градусов. В решателе `reactingQGDFoam` применялись следующие настроечные параметры, которые определены в работе [7]: $\alpha_{QGD} = 0.15$, $Sc_{QGD} = 0$.

Результаты валидации используемого подхода и сравнение с экспериментальными данными при истечении струи воздуха показана на (рис. 2). В работе применялась открытая контрольная поверхности для расчета акустического давления исходя из рекомендаций, представленных в работах [9]. На (рис. 2,б) показана направ-

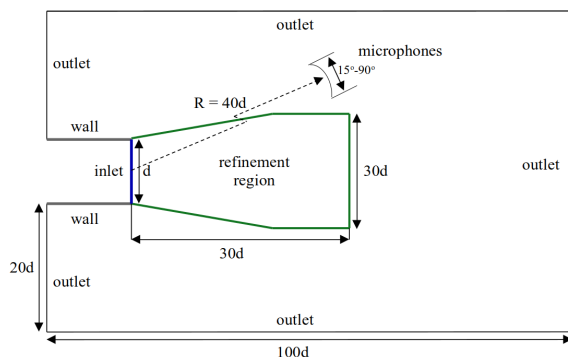


Рис. 1: Схема расчётной области

ленность уровня звукового давления, можно видеть, что у струи водорода значительно выше уровень шума и угол направленности акустического даавления.

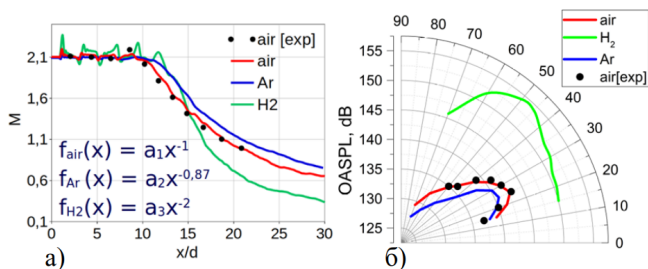


Рис. 2: Результаты моделирования: а)распределение числа Маха вдоль оси струи; б)направленность уровня звукового давления

Работа выполнена при поддержке Московского центра фундаментальной и прикладной математики, Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-283.

Литература

1. T.R. Troutt, D.K. McLaughlin. Experiments on the flow and acoustic properties of a moderate Reynolds-number supersonic jet. J. Fluid Mech. v.116, 1982, pp. 123–156
2. QGDSolvers: <https://github.com/unicfdlab/QGDSolver>, по состоянию на 31.05.2024

3. Т.Г. Елизарова. Квазигазодинамические уравнения и методы расчёта вязких течений. 2007
4. G. Brès, F. Pérot, D. Freed. A Ffowcs Williams-Hawkins solver for Lattice-Boltzmann based computational aeroacoustics. AIAA Paper., 2010, pp. 3711.
5. A. Epikhin, I. Evdokimov, M. Kraposhin, M. Kalugin, S. Strijhak. Development of a dynamic library for computational aeroacoustics applications using the OpenFOAM open source package. Procedia Computer Science, v.66, 2015, pp. 150-157.
6. libAcoustics library, <https://github.com/unicfdlab/libAcoustics>, по состоянию на 31.05.2024
7. A. Epikhin, M. Kraposhin. Prediction of the Free Jet Noise Using Quasi-gas Dynamic Equations and Acoustic Analogy. Lecture Notes in Computer Science, v.12143, 2020.
8. A. Epikhin, I. But. Numerical Simulation of Supersonic Jet Noise Using Open Source Software //ICCS Cham: Springer Nature Switzerland, v.14077, 2023, pp. 292-302.
9. M.L. Shur, P.R. Spalart, and M.K. Strelets. Noise prediction for increasingly complex jets. Part I: Methods and tests. International journal of aeroacoustics v.4.3, 2005, pp. 213-245.