

Научная статья  
УДК 533.17+534.2  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181890>

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ ФОКСА-ВИЛЬЯМСА ХОКИНГСА СПОСОБА СНИЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ С ПОТОКОМ ВОДЫ**

**Олеся Владимировна Исправникова<sup>1✉</sup>, Руслан Александрович Пешков<sup>2</sup>,  
Артем Викторович Федоров<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>1</sup>[ispravnikova.2000@mail.ru](mailto:ispravnikova.2000@mail.ru)✉

<sup>2</sup>[peshkovra@susu.ru](mailto:peshkovra@susu.ru)

<sup>3</sup>[fedorovav@susu.ru](mailto:fedorovav@susu.ru)

***Аннотация.*** Развитие аэрокосмической отрасли приводит к ужесточению требований к летательным аппаратам по уровню шума, что стимулирует поиск новых способов его снижения. Определение уровней акустического шума является сложной задачей, решение которой зачастую требует проведения дорогостоящих экспериментов в натуральных условиях. Применение методов численного моделирования позволяет оптимизировать исследовательский процесс, сократить количество натуральных экспериментов и эффективно изучать влияние различных факторов на акустические характеристики.

В работе исследована эффективность снижения шума сверхзвуковой струи путем ее взаимодействия с водным потоком. Численное моделирование процесса выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Для расчета акустических полей применен метод Фокса Вильямса-Хокинга (Ffowcs Williams & Hawkings), обладающий преимуществами в скорости и точности вычислений по сравнению с другими методами, что делает его широко востребованным инструментом в современной аэроакустике. Верификация численной модели проведена путем сравнения полученных результатов с данными экспериментальных измерений. Полученные результаты демонстрируют потенциал взаимодействия сверхзвуковой струи с водным потоком для снижения уровня шума и подтверждают эффективность метода Фокса Вильямса-Хокинга для решения подобных задач.

**Ключевые слова:** аэроакустика, шум, сверхзвуковая струя, ANSYS Fluent, турбулентность

**Для цитирования:** Исправникова О.В., Пешков Р.А., Федоров А.В. Численное моделирование интегральным методом Фокса-Вильямса Хокинга способа снижения акустического давления при помощи взаимодействия реактивной струи с потоком воды // Труды МАИ, 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181890>

# NUMERICAL MODELING USING THE FOX WILLIAMS-HAWKINGS INTEGRAL METHOD OF REDUCING ACOUSTIC PRESSURE USING THE INTERACTION OF A JET STREAM WITH A WATER FLOW

Olesya V. Ispravnikova<sup>1✉</sup>, Ruslan A. Peshkov<sup>2</sup>, Artem V. Fedorov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>South Ural state university, Chelyabinsk, Russia

<sup>1</sup>[ispravnikova.2000@mail.ru](mailto:ispravnikova.2000@mail.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[peshkovra@susu.ru](mailto:peshkovra@susu.ru)

<sup>3</sup>[fedorovav@susu.ru](mailto:fedorovav@susu.ru)

**Abstract.** Aeroacoustics is a branch of aerospace engineering that focuses on the study of the generation, propagation, and control of noise in relation to aircraft and other aerodynamic systems. This involves analyzing and optimizing various factors that contribute to noise, such as engine design, airflow and structural components.

The development of the aerospace industry leads to increased requirements for the noise level of aircraft, which necessitates the search for new ways to reduce it.

In modern aeroacoustics, which studies sound phenomena that include many aspects such as generation, propagation and recording of sound, methods of interdisciplinary physics are actively used. The concept of aeroacoustic phenomena has expanded from the simple study of sound generation to a process that includes not only sound generation, but also sound propagation and its recording at receivers. Moreover, aeroacoustics is not limited to just external noise pollution as well, but also deals with flow-structure interaction, aerovibroacoustics, damage detection and structural health monitoring, etc.

Determining acoustic noise levels is a complex task, often requiring large-scale experiments.

Numerical modeling allows one to effectively study the influence of various parameters on

system characteristics, while reducing the amount of necessary experimental research. The purpose of this work was to numerically simulate the process of reducing the noise of a supersonic jet through its interaction with a water flow. The simulation was carried out using the ANSYS Fluent software package. To calculate the acoustic fields, the Fox-Williams-Hawkings method was used, which has significant advantages in the speed and accuracy of calculations compared to other methods and is widely used in solving modern aeroacoustics problems.

**Keywords:** aeroacoustics, noise, supersonic jet, ANSYS Fluent, turbulence

**For citation:** Ispravnikova O.V., Peshkov R.A., Fedorov A.V. Numerical modeling using the Fox Williams-Hawkings integral method of reducing acoustic pressure using the interaction of a jet stream with a water flow. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181890>

## Введение

Газовая сверхзвуковая струя, истекающая из двигательной установки ракеты-носителя при старте, представляет опасность из-за образования высокого уровня акустического давления в момент старта, что может оказать негативное влияние на конструкцию по нескольким причинам. Во-первых, силы, создаваемые шумом, могут вызвать вибрации и механические напряжения, которые могут повредить структурные компоненты ракеты-носителя. Во-вторых, интенсивное звуковое давление может вызвать разрушение чувствительных электронных систем, установленных на борту ракеты. Кроме того, шум может также повлиять на

устойчивость самой газовой струи, что может привести к асимметричным силам на конструкцию и возникновению нежелательных аэродинамических эффектов [1-6].

### Уравнения Эйлера и Навье-Стокса

Для сверхзвуковой газовой струи необходимо учесть такие факторы, как разрежение потока, изменение плотности и скорости со звуковой скоростью, возникающие волны удара и т.д. Это приводит к возникновению системы уравнений.

Уравнения динамики сжимаемого газа в декартовых координатах  $x, y, z$  представляются следующим образом [7]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = RHS, U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho u_z \\ \rho h_0 - p \end{bmatrix}, F_\alpha = \begin{bmatrix} \rho u_\alpha \\ \rho u_x u_\alpha + \delta_{\alpha x} p \\ \rho u_y u_\alpha + \delta_{\alpha y} p \\ \rho u_z u_\alpha + \delta_{\alpha z} p \\ \rho h_0 u_\alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$F_\alpha^v, \alpha = x, y, z,$$

где  $t$  – время;

$RHS = 0$  в случае уравнений Эйлера (невязкий и нетеплопроводный газ);

$\delta_{\alpha\beta}$  – символ Кронекера;

$u = (u_x, u_y, u_z)$  – вектор скорости газа и его компоненты;

$\rho$  – плотность газа;

$p$  – давление;

$h_0$  – полная удельная энтальпия.

Для идеального газа полная удельная энтальпия представлена в виде:

$$h_0 = \frac{1}{2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) + h,$$

$$h = \frac{\gamma P}{(\gamma - 1)\rho},$$

где  $h$  – удельная энтальпия газа;

$\gamma$  – показатель адиабаты.

Ударные волны и взрывы, которые могут наблюдаться при высоких скоростях сверхзвукового потока, являются одними из основных источников шума, генерируемый сверхзвуковой струей. Поэтому возникает потребность в разработке численных моделей генерации шума сверхзвуковой струи, а также поиске эффективных методов снижения возникающего шума [8].

С помощью уравнения Эйлера могут быть изучены процессы генерации ударных волн, но для предсказания характеристик шума, таких как интенсивность, спектральный состав и распределение по направлениям, могут потребоваться дополнительные подходы, такие как уравнения Навье-Стокса, являющиеся более сложными математическими моделями, которые учитывают вязкость и турбулентность потока.

В случае трехмерного течения, уравнения Навье-Стокса отличаются от уравнений Эйлера добавлением правых частей, представленных в следующем виде [7]:

$$RHS = \frac{\partial F_x^v}{\partial x} + \frac{\partial F_y^v}{\partial y} + \frac{\partial F_z^v}{\partial z}, F_\alpha^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{x\alpha} \\ \tau_{y\alpha} \\ \tau_{z\alpha} \\ q_\alpha + u_x \tau_{x\alpha} + u_y \tau_{y\alpha} + u_z \tau_{z\alpha} \end{bmatrix}, \alpha = x, y, z. \quad (2)$$

Компоненты тензора вязких напряжений  $\left(\tau_{\alpha\beta}\right)$  и теплового потока  $(q_{\alpha})$ ,

включенные в уравнение (2), представлены следующим образом:

$$\tau_{\alpha\beta} = \mu \left[ \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial \beta} + \frac{\partial u_{\beta}}{\partial \alpha} - \frac{2}{3} (\nabla u) \delta_{\alpha\beta} \right],$$

$$\nabla u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$q_{\alpha} = \lambda \frac{\partial T}{\partial \alpha} = \frac{\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{\mu}{Pr} \left[ \frac{\partial h_0}{\partial \alpha} + \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial \alpha} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial \alpha} + u_{xz} \frac{\partial u_z}{\partial \alpha} \right) \right], \alpha, \beta = x, y, z.$$

где  $\mu$  и  $\lambda$  – коэффициенты вязкости и теплопроводности,

Pr – число Прандтля.

### **Методы снижения уровня шума при старте ракеты-носителя**

Как уже упоминалось ранее, акустический шум, возникающий в процессе запуска ракетного двигателя, может составлять серьезную угрозу для безопасности людей и целостности конструкций. В свете вышеизложенного, требуется проведение исследований и разработка эффективных методов для снижения или контроля избыточного шума. В настоящее время, существующие техники снижения уровня шума можно классифицировать на две основные группы: активные и пассивные методы. Применение активных методов включает изменение геометрии сопла путём использования зубчатых кромок в выходном сечении или создания коаксиального потока сниженной скорости [9, 10], а также других подходов. Применение пассивных методов основывается на использовании акустических материалов с высоким

коэффициентом поглощения звука. Однако данная техника может столкнуться с определенными ограничениями в конструктивной реализации, что существенно ограничивает область применения пассивных методов [11].

Подробно изучив различные методы уменьшения шума, генерируемого сверхзвуковыми струями, можно сказать, что ввиду кратковременности акустического воздействия, разработка альтернативных методов шумоподавления, не требующих конструктивного вмешательства в ракету-носитель, представляется более рациональным направлением исследований. Поэтому систему для снижения шума целесообразнее устанавливать на стартовой площадке. Сравнительный анализ существующих технологий шумоподавления показывает, что система ввода воды в струи двигательной установки обладает высоким потенциалом в области снижения акустического воздействия при запуске ракет-носителей [12, 13].

Большинство из проводимых исследований, направленных на изучение эффективных методов снижения шума путем подачи воды в газовую струю, основано на экспериментальных методах, однако, несмотря на это, математическое моделирование все равно является неотъемлемой частью оперативного получения результатов. Использование математических моделей, может быть, одним из подходов к изучению взаимодействия сверхзвуковой газовой струи с водяными струями и стартовой площадкой [14].

### **Методы вычислительной аэроакустики**

В рамках вычислительной аэроакустики применяются два основных класса методов для прогнозирования генерации и распространения шума: методы прямого

моделирования, решающие полные уравнения гидродинамики, и интегральные методы, основанные на акустической аналогии. В проводимом исследовании применен метод, который относится ко второй категории – метод Фокса Вильямса-Хокинга (*FWH*).

Модель акустической аналогии Фокса Вильямса-Хокинга, реализована в программном пакете *ANSYS Fluent*, и может быть применена для моделирования распространения звуковых источников для разнообразных объектов, от тел не обтекаемой формы до вращающихся лопастей вентилятора.

Уравнение *FWH* было получено в [15], а краткий вывод представлен в [16]. Дифференциальная форма уравнения Фокса Вильямса-Хокинга представляет собой волновое уравнение неоднородного характера, полученное из уравнения Навье-Стокса с применением обобщенных функций.

Рассматривается задача распространения акустических волн, генерируемых турбулентным течением сжимаемой среды вокруг твердых тел в неограниченном пространстве. Акустическое поле анализируется с использованием волнового уравнения, сформулированного для контрольной поверхности, охватывающей объекты исследования. Поверхность описывается функцией  $f(\bar{x}, t)$ , соответствующей заданным граничным условиям:

$$f(\bar{x}, t) = \begin{cases} >: \text{вне поверхности} \\ =: \text{на поверхности} \\ <: \text{внутри поверхности} \end{cases} .$$



Рисунок 1 – Процедура определения контрольной поверхности в интегральном методе Фокса-Вильямса-Хокинга (*FWH*)

Благодаря использованию уравнения поверхности, уравнение сохранения импульса может быть преобразовано к форме, применимой как во внешней среде, так и внутри твердых тел, что позволяет проводить анализ во всей рассматриваемой области [16]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial f} \left( \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x_i} v_i = 0, \quad (3)$$

где  $H$  – функция Хевисайда, которая определяется как:

$$H(f(\bar{x}, t)) = \begin{cases} 1, & f(\bar{x}, t) > 0 \\ 0, & f(\bar{x}, t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$v_i = \frac{\partial x_i}{\partial t} - \text{скорость контрольной поверхности.}$$

$\delta$  – дельта-функция Дирака:

$$\delta(f(\bar{x}, t)) = \frac{\partial H}{\partial f} \begin{cases} 1, & f(\bar{x}, t) = 0 \\ 0, & f(\bar{x}, t) \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Следовательно:

$$\frac{\partial H}{\partial x_i} = \frac{\partial H}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial x_i} = \delta(f) \cdot |\nabla f| n_i, \quad (6)$$

где  $n_i$  – локальная внешняя нормаль поверхности управления:

$$n_i = \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}}{\sqrt{\frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_j}}}. \quad (7)$$

Применение аппарата обобщенных функций позволяет провести преобразование основных уравнений аэродинамики к форме уравнения Фокса-Вильямса-Хокинга:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [H(f) \rho u_i] + \frac{\partial}{\partial x_i} [H(f) c_0^2 (\rho - \rho_0)] = & - \frac{\partial}{\partial x_j} [T_{ij} H(f)] + \\ & + [\rho u_i (u_i - v_j) + (p - p_0) \delta_{ij} - \tau_{ij}] \frac{\partial H(f)}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – плотность звука в невозмущенной среде;

$p_0$  – давление звука в невозмущенной среде;

$c_0$  – скорость звука в невозмущенной среде;

$u_i$  –  $i$ -я компонента скорости газа;

$v_j$  –  $j$ -я компонента скорости контрольной поверхности;

$\tau_{ij}$  – компоненты тензора вязких напряжений;

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$T_{ij}$  – компоненты тензора напряжений Лайтхилла:

$$T_{ij} = \rho u_i v_j + [(p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0)] \delta_{ij} - \tau_{ij}. \quad (9)$$

В уравнении (8) и последующем предполагается суммирование по повторяющимся индексам.

Соответственно уравнению сохранения импульса, уравнение непрерывности может быть преобразовано следующим образом [16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}[H(f)(\rho - \rho_0)] + \frac{\partial}{\partial x_i}[H(f)\rho u_i] = [\nu(u_i - u_j) + \rho_0 v_i] \frac{\partial H(f)}{\partial x_i}, \quad (10)$$

Последовательное применение операции дифференцирования по времени к уравнению (10) и операции дивергенции к уравнению (8) приводит к получению неоднородного волнового уравнения, описывающего эволюцию акустической плотности  $(\rho - \rho_0)$ , представляющей собой возмущение плотности газа относительно невозмущенного состояния:

$$\left( \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) [Hc_0^2(\rho - \rho_0)] = -\frac{\partial}{\partial x_i} [L_i |\nabla f| \delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 U_n |\nabla f| \delta(f)] + \frac{\partial^2 (HT_{ij})}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (11)$$

где приняты следующие обозначения:

$$L_i = \left[ (p - p_0) \delta_{ij} - \tau_{ij} + \rho u_i (u_j - v_j) \right] n_j, \quad (12)$$

$$U_n = U_i n_i U_i = \frac{\rho u_i}{\rho_0} + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) v_i, \quad (13)$$

Уравнение (11) называется дифференциальной формой уравнения *FWH* и было получено и опубликовано *J. E. Ffowcs-Williams* и *D. L. Hawkings* в 1969 г. [15-17].

## Выбор дополнительных методов решения в *ANSYS Fluent*

Для расчета акустического шума необходимо определить метод моделирования двухфазных потоков, состоящих из газа и жидкости.

Вычислительная гидродинамика имеет широкий спектр приложений, которые способны моделировать не только однофазные, но и двухфазные течения жидкости. *ANSYS Fluent* занимает ведущее положение в области технологии многофазных течений. Он предоставляет инженерам различные инструменты для анализа процессов, происходящих в оборудовании при двухфазном течении. *ANSYS Fluent* использует полный комплект моделей для исследования взаимодействия между разными фазами потока: газом и жидкостью, дисперсными частицами и каплями, со свободными поверхностями. В *ANSYS Fluent* имеются три разные модели для описания многофазных взаимодействий: модель объема жидкости (*VOF*), модель Эйлера и модель смеси (*mixture model*) [18].

Модель объема жидкости (*volume-of-fluid, VOF*) – это метод численного моделирования, используемый в *ANSYS Fluent* для анализа динамики многофазных течений, в которых границы раздела между фазами играют существенную роль. Эта модель особенно эффективна для моделирования течений с несмешивающимися жидкостями, где важно отслеживать форму и положение межфазной поверхности. *VOF* применима для широкого спектра многофазных течений с несмешивающимися жидкостями и позволяет точно моделировать форму и положение границы раздела фаз, что особенно важно для анализа течений с большими деформациями интерфейса, таких как формирование капель, пузырьков, волн на свободной поверхности. *VOF*

более требовательна к вычислительным ресурсам по сравнению с моделями, не отслеживающими границу раздела фаз, такими как модель смеси. Реализация алгоритмов реконструкции интерфейса может быть сложной и требует тщательного подбора параметров для получения стабильного и точного решения. В аэроакустике модель *VOF* может быть использована для исследования взаимодействия потока с жидкими границами, такими как: течения вокруг летательных аппаратов с учетом образования конденсационных следов, которые могут быть источником шума, а также *VOF* может быть использована для анализа процессов взаимодействия струй с жидкими каплями, что может приводить к генерации звука [18].

Модель Эйлера в *ANSYS Fluent* – это подход к моделированию многофазных течений, основанный на рассмотрении каждой фазы как континуума, для которого решаются отдельные уравнения сохранения массы, импульса и энергии. В рамках этой модели предполагается, что каждая фаза занимает определенную область в пространстве и не проникает в области, занятые другими фазами. Модель Эйлера позволяет детально описывать характеристики каждой фазы и их изменение в процессе течения. Это особенно важно для анализа течений, в которых фазы имеют существенно разные физические свойства. Модель Эйлера позволяет учитывать широкий спектр межфазных взаимодействий, включая импульсный, тепловой и массообмен. Это позволяет моделировать сложные многофазные течения, в которых межфазные взаимодействия играют ключевую роль. Модель Эйлера может быть очень требовательна к вычислительным ресурсам, особенно для течений с большим количеством фаз или сложной геометрией. Модель Эйлера позволяет моделировать

течения струй, содержащих дисперсные капли или пузырьки, и исследовать их влияние на акустическое поле [18].

Модель смеси (*mixture model*) в *ANSYS Fluent* – это подход для моделирования многофазных течений, основанный на представлении о гомогенной смеси фаз. Она применима в случаях, когда размер отдельных включений фаз значительно меньше характерного размера исследуемой области, и фазы достаточно интенсивно перемешаны. Модель особенно эффективна при моделировании течений с дисперсными фазами, такими как газожидкостные смеси с пузырьками, каплями или твердыми частицами. Вместо отслеживания отдельных границ раздела фаз, как в модели *VOF*, модель смеси оперирует усредненными свойствами потока, такими как плотность, скорость, вязкость, энтальпия, которые рассчитываются для каждой ячейки расчетной сетки. Эти усредненные свойства отражают объемные доли каждой фазы в ячейке. Для каждой вторичной фазы решается уравнение переноса, которое описывает изменение ее объемной доли в зависимости от конвекции, диффузии и других источников, таких как фазовые переходы или химические реакции. Модель учитывает взаимодействие между фазами, такое как межфазный теплообмен и импульсный обмен. Для этого используются модели замыкания, описывающие силы взаимодействия между фазами (например, сила сопротивления для движения частиц в жидкости). Модель смеси менее требовательна к вычислительным ресурсам по сравнению с моделями, отслеживающими границы раздела фаз, такими как *VOF*, поскольку не требует решения уравнений для интерфейса. Модель хорошо подходит для моделирования течений с высокой концентрацией дисперсных фаз, где

отслеживание отдельных включений фаз непрактично, а также позволяет учитывать различные межфазные взаимодействия, такие как теплообмен, импульсный обмен, массообмен. В аэроакустике модель смеси может быть применена для моделирования течений, в которых дисперсные фазы играют существенную роль в генерации звука.

Для моделирования многофазного течения в *ANSYS Fluent* использована модель смеси (*mixture model*), которая может быть хорошей заменой полной Эйлеровой многофазной модели в некоторых ситуациях. Модель смеси может функционировать аналогично полной многофазной модели, однако при этом решается меньшее количество переменных [18, 19].

### Расчетная схема и результаты численного моделирования шума сверхзвуковой газовой струи

Для анализа эффекта параметров водяного впрыска на уровень шумоподавления сверхзвуковой струи применялся описанный выше метод *FWH*, в качестве модели расчета использовались параметры экспериментальной аппаратуры, описанные в работе (рисунок 2) [20].

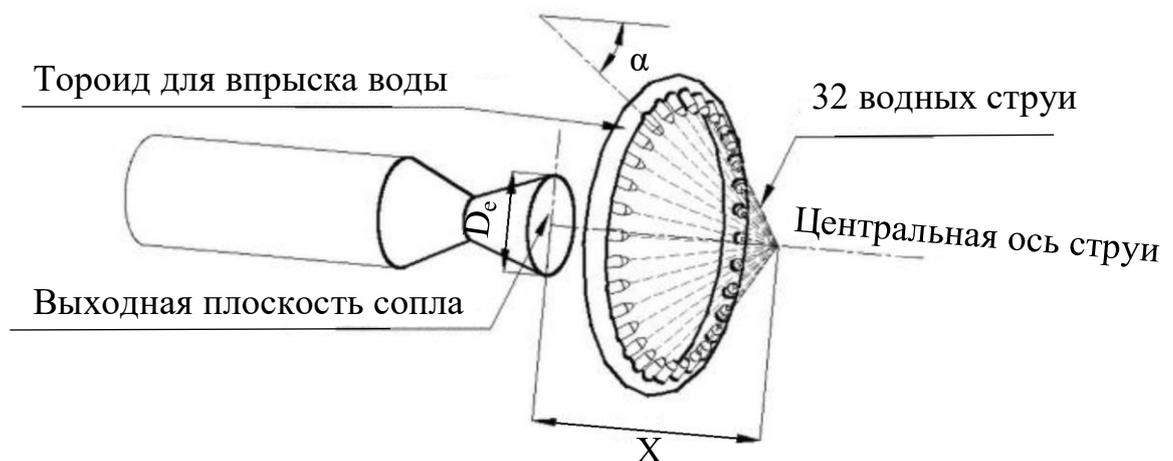


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Для исследования в работе варьировалось осевое расположение коллектора  $X$  впрыска воды в газовую струю при фиксированном угле  $60^\circ$  (рисунок 3).

В *ANSYS Meshing* использован «Автоматический режим» для создания сетки на поверхности. Для увеличения плотности сетки вблизи стенок сопла применен параметр *Refinement* со значением 3. Для остальной части расчетной области построена блочная сетка с использованием *ICEM CFD* как вспомогательной программы.

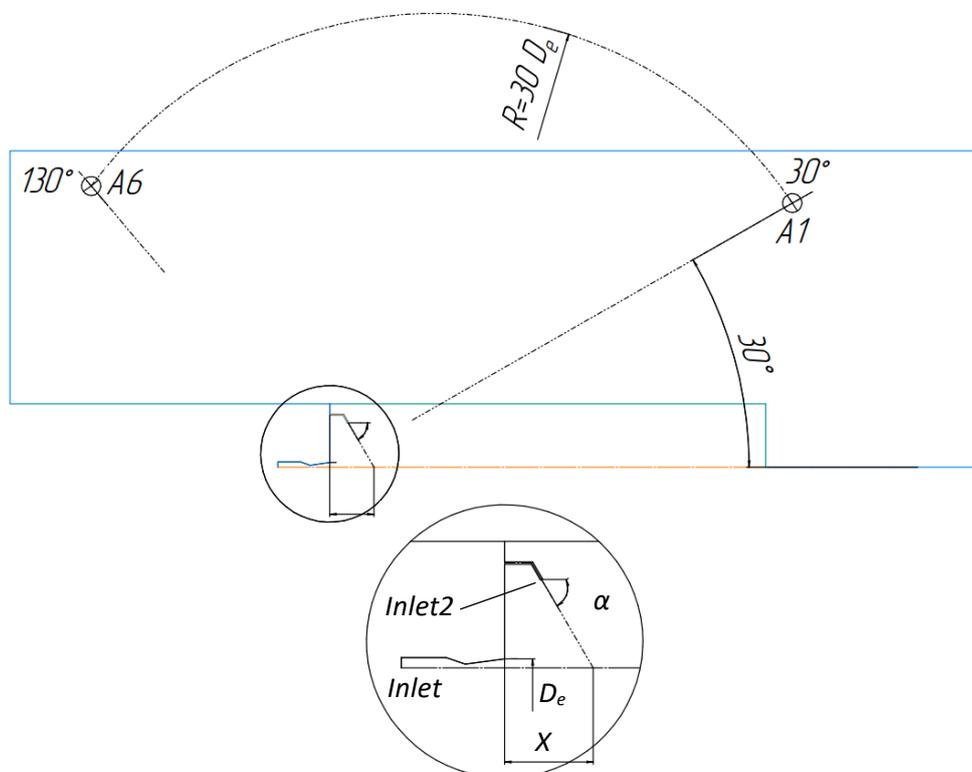


Рисунок 3 – Геометрия сопла

В рамках численного моделирования течений с использованием проницаемых контрольных поверхностей, необходимо обеспечить совпадение узлов сетки на границе раздела. Это позволяет создать единую расчетную область и исключить появление нефизических возмущений потока, вызванных неоднородностью сетки.

Численное моделирование гидрогазодинамических и акустических процессов реализовано в два этапа. На первом этапе, для определения начальных условий, применялось стационарное моделирование с  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Вторым этапом исследования стало моделирование динамики процесса с дискретным временным шагом  $10^{-5}$  с. Анализ акустических характеристик проводился с применением интегрального метода  $FWH$  и контрольной поверхности, заданной на границе раздела сред (*interface*) для обеспечения трансфера данных. Численное решение гидродинамической задачи осуществлялось в осесимметричной постановке с использованием алгоритма, основанного на давлении. Дискретизация уравнений выполнена с применением схемы второго порядка точности для аппроксимации конвективных потоков [18].

Для анализа акустических характеристик в *ANSYS Fluent* используется встроенный модуль быстрого преобразования Фурье ( $FFT$ ), который позволяет получить частотный спектр из временных результатов.

Модуль быстрого преобразования Фурье ( $FFT$ ) в *ANSYS Fluent* – это мощный инструмент для анализа частотных характеристик различных параметров потока, получаемых в результате численного моделирования.  $FFT$  позволяет преобразовать сигнал из временной области в частотную, предоставляя информацию о частотном спектре сигнала. Это позволяет выявить доминирующие частоты, характерные для течения, и проанализировать их вклад в общую картину.

В аэроакустике  $FFT$  широко применяется для анализа шума, генерируемого турбулентными течениями. Модуль  $FFT$  в *ANSYS Fluent* является ценным

инструментом для анализа частотных характеристик течений. *FFT* предоставляет информацию, которая не может быть получена при анализе только временных характеристик сигнала, помогает лучше понять физику течения, анализировать шум и вибрации, а также дает возможность оптимизировать конструкции с целью улучшения их акустических характеристик.

Для сопоставления результатов с данными из работы [20] построен график, отражающий зависимость от числа Струхала, которое вычисляется по формуле:

$$St = \frac{fD_a}{v_a},$$

где  $f$  – частота.

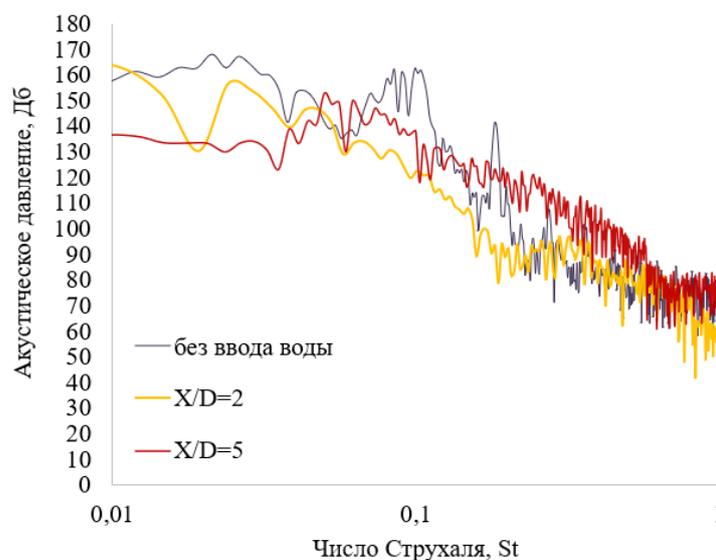


Рисунок 4 – Исследовано влияние осевого положения инжекции воды ( $X/D$ ) на спектральные характеристики шума сверхзвуковой струи при угле наблюдения  $30^\circ$  (параметры воды:  $60^\circ$ ,  $p_w=4$  бар и  $MFR=2$ )

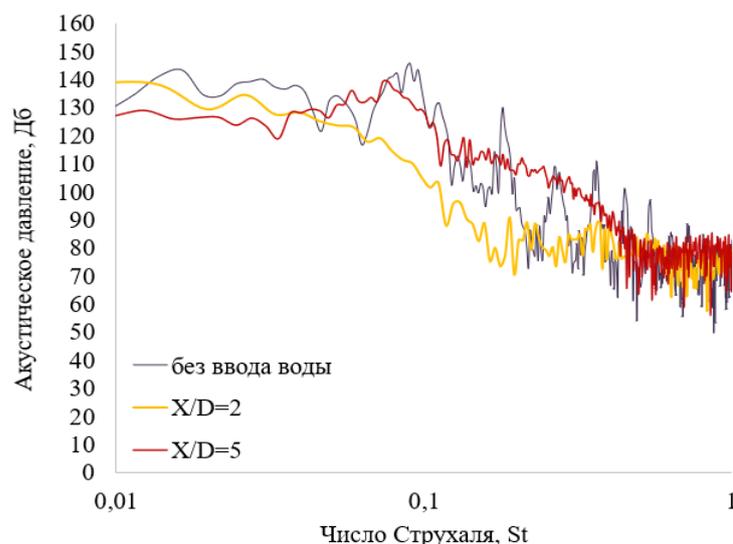


Рисунок 5 – Исследовано влияние осевого положения инъекции воды ( $X/D$ ) на спектральные характеристики шума сверхзвуковой струи при угле наблюдения  $130^\circ$  (параметры воды:  $60^\circ$ ,  $p_w=4$  бар и  $MFR=2$ )

Анализ зависимости уровня шума от осевого смещения ( $X/D$ ) при угле расположения приемника  $30^\circ$  (рисунок 4) демонстрирует снижение максимального уровня шума приблизительно на 6 дБ при  $X/D=2$  и на 15 дБ при  $X/D=5$ , что подтверждает влияние положения приемника на характеристики акустического поля.

На рисунке 5 представлены результаты измерений шума при угле расположения приемника  $130^\circ$ . Максимальный уровень шума уменьшается с увеличением расстояния от источника, что подтверждается снижением на 6 дБ при  $X/D=2$  и на 5 дБ при  $X/D=5$ . На основе полученных данных можно заключить, что осевое смещение приемника оказывает существенное влияние на регистрируемый уровень шума.

Сравнение эффективности снижения шума при различных положениях инъекции воды показало, что наибольшее уменьшение акустического давления достигается при инъекции в осевом положении  $X/D=2$ . В работе [20], с которой

проводилось сравнение, было сделано несколько важных выводов на основании результатов, которые были получены в ходе проведенного эксперимента:

- впрыск ближе к выходному отверстию сопла достаточно эффективен в диапазоне средних и высоких частот, что подразумевает его влияние на ударный шум, а также на мелкомасштабный шум смешения.

- крупномасштабное перемешивание в меньшей степени зависит от места впрыска. Интересно, что в области ниже по течению наблюдается значительный низкочастотный ударный шум.

### **Выводы по результатам численного моделирования**

Результаты, полученные численными методами, оказались отличными от экспериментальных. Причиной этому могли послужить следующие факторы:

- недостаточная плотность сетки или же двумерная осесимметричная постановка задачи негативно сказываются на результатах вычислений, так как происходит потеря небольших источников шума (мелких вихрей), благодаря которым формируются основные источники шума (крупные вихри) и тем самым происходит снижение акустической мощности струи;

- упрощение модели, так как численное моделирование часто основывается на упрощенных предположениях о системе или процессе, которые могут отличаться от реального мира, что может привести к неточностям и отклонениям от реальных результатов;

– внешние факторы и условия в экспериментах, которые трудно воспроизводить в численных моделях, и которые могут оказывать существенное влияние на результаты и приводить к их отличиям.

Различие результатов экспериментальных и численных исследований может быть обусловлено совокупностью этих факторов. Поэтому необходимо проводить как экспериментальные, так и численные исследования для достижения более полной и точной картины системы или процесса. Экспериментальные исследования позволяют получить реальные данные о поведении системы или процесса в различных условиях, а численные исследования позволяют проводить анализ и оптимизацию системы или процесса с использованием математических моделей и алгоритмов.

В дальнейшем, рекомендуется провести более подробное исследование точности и достоверности результатов сравнения.

### **Список источников**

1. Богданюк Д.О., Волков К.Н., Емельянов В.Н., Пустовалов А.В. Газовая динамика стационарных сверхзвуковых газовых струй с инертными частицами при их истечении в среду с низким давлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 2. С. 403-412. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-2-403-412](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-403-412)
2. Абдурашидов Т.О., Бут А.Б., Чупина Е.С. Результаты численного моделирования истечения сверхзвуковой струи // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174624>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-24)

3. Горев В.Н., Попов С.А., Козлов В.В. Экспериментальное исследование возможности применения акустики для управления срывом потока на крыле летательного аппарата // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26026>
4. Запрягаев В.И., Иванов И.Э., Крюков И.А., Локотко А.В. Исследование структуры турбулентной струи // VII Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях, NPNJ-2008 (Алушта, 24-31 мая 2008): сборник трудов. - М.: Изд-во МАИ, 2008. С. 192–195.
5. Кравчук М.О., Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В. Вопросы моделирования турбулентности для расчета сверхзвуковых высокотемпературных струй // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=58536>
6. Ларина Е.В., Крюков И.А., Иванов И.Э. Моделирование осесимметричных струйных течений с использованием дифференциальных моделей турбулентной вязкости // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75565>
7. Родионов А.В. Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам: Дисс... канд. физ.-мат. наук. Саров, 2019. 299 с.
8. Акимов Г.А. Научно-педагогическая школа кафедры аэрогазодинамики и динамики полета. – СПб.: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2012. – 220 с.

9. Либерман М.Ю. О моделировании процессов формирования пусковых нагрузок, оказывающих динамическое воздействие на космический аппарат // Вопросы электромеханики. 2013. Т. 136. С. 19–30.
10. Носатенко П.Я., Бобров А.В., Баранов М.Л., Шляпников А.Н. Экспериментальное определение акустических нагрузок при пусках РН «Стрела» и расчетное определение режимов экспериментальной отработки выводимых космических аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 112–123.
11. Попов П.А., Синдюков А.А. Конструктивные мероприятия по снижению акустического давления внутри изделий ракетно-космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. Т. 43. № 1. С. 68–79.
12. Губанов Д.А. Влияние микроструй на структуру и акустическое излучение сверхзвуковой недорасширенной струй: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 1990. –140 с.
13. Norum T.D. Reduction in multi component jet noise by water injection // AIAA Paper, 2004. DOI: [10.2514/6.2004-2976](https://doi.org/10.2514/6.2004-2976)
14. Ffowcs Williams J.E., Hawkings D.L. Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion // Philosophical Transactions of the Royal Society, 1969, vol. A264, no. 1151, pp. 321-342. DOI: [10.1098/rsta.1969.0031](https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031)

15. Brentner K.S., Farassat F. An analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces // *AIAA Journal*, 1998, vol. 36, no. 8, pp. 1379–1386. DOI: [10.2514/2.558](https://doi.org/10.2514/2.558)
16. Kefan Tang M.S. Numerical Simulation of the Flow-Induced Noise by Means of the Hybrid Method by LES and Aeroacoustic Analogy. Dissertation, Siegen University, 2004.
17. Weckmüller C., Gu´erin S., Richter C. Numerical investigation of geometry and mean flow effect on acoustic radiation from a duct inlet // *Proceedings of the 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, 2009*. DOI: [10.2514/6.2007-3535](https://doi.org/10.2514/6.2007-3535)
18. FLUENT 12.0 Theory Guide. URL: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)
19. Зиганшин А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent. – Казань: Изд-во Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2013. – 81 с.
20. Sankaran S., Ignatius J.K., Ramkumar R. et al. Suppression of high mach number rocket jet noise by water injection // *Journal of Spacecraft and Rocket*, 2009, vol. 46 (26), pp. 1164–1170. DOI: [10.2514/1.43421](https://doi.org/10.2514/1.43421)

## References

1. Bogdanyuk D.O., Volkov K.N., Emel'yanov V.N., Pustovalov A.V. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 403-412. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-2-403-412](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-403-412)
2. Abdurashidov T.O., But A.B., Chupina E.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174624>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-24)

3. Gorev V.N., Popov S.A., Kozlov V.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26026>
4. Zapryagaev V.I., Ivanov I.E., Kryukov I.A., Lokotko A.V. *VII Mezhdunarodnaya konferentsiya po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh, NPNJ-2008: sbornik trudov*, Moscow, Izd-vo MAI, 2008, pp. 192–195.
5. Kravchuk M.O., Kudimov N.F., Safronov A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58536>
6. Larina E.V., Kryukov I.A., Ivanov I.E. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75565>
7. Rodionov A.V. *Razrabotka metodov i programm dlya chislennogo modelirovaniya neravnovesnykh sverkhzvukovykh techenii v prilozhenii k aerokosmicheskim i astrofizicheskim zadacham* (Development of methods and programs for numerical modeling of nonequilibrium supersonic flows as applied to aerospace and astrophysical problems), Doctor's thesis, Sarov, 2019, 299 p.
8. Akimov G.A. *Nauchno-pedagogicheskaya shkola kafedry aerogazodinamiki i dinamiki poleta* (Scientific and pedagogical school of the department of aerogas dynamics and flight dynamics), Saint Petersburg, Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet "Voenmekh", 2012, 220 p.
9. Liberman M.Yu. *Voprosy elektromekhaniki*, 2013, vol. 136, pp. 19–30.
10. Nosatenko P.Ya., Bobrov A.V., Baranov M.L., Shlyapnikov A.N. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2010, no. 2, pp. 112–123.

11. Popov P.A., Sindyukov A.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 68–79.
12. Gubanov D.A. *Vliyanie mikrostrui na strukturu i akusticheskoe izluchenie sverkhzvukovoi nedorasshirennoi strui* (Influence of microjets on the structure and acoustic radiation of supersonic underexpanded jets). Doctor's thesis, Novosibirsk, ITPM SO RAN, 1990, 140 p.
13. Norum T.D. Reduction in multi component jet noise by water injection, *AIAA Paper*, 2004. DOI: [10.2514/6.2004-2976](https://doi.org/10.2514/6.2004-2976)
14. Ffowcs Williams J.E., Hawkings D.L. Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1969, vol. A264, no. 1151, pp. 321-342. DOI: [10.1098/rsta.1969.0031](https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031)
15. Brentner K.S., Farassat F. An analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for movingsurfaces, *AIAA Journal*, 1998, vol. 36, no. 8, pp. 1379–1386. DOI: [10.2514/2.558](https://doi.org/10.2514/2.558)
16. Kefan Tang M.S. *Numerical Simulation of the Flow-Induced Noise by Means of the Hybrid Method by LES and Aeroacoustic Analogy*. Dissertation, Siegen University, 2004.
17. Weckmüller C., Gu´erin S., Richter C. Numerical investigation of geometry and mean flow effect on acousticradiation from a duct inlet, *Proceedings of the 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Rome, Italy, 2009. DOI: [10.2514/6.2007-3535](https://doi.org/10.2514/6.2007-3535)
18. *FLUENT 12.0 Theory Guide*. URL: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)

19. Ziganshin A.M. *Vychislitel'naya gidrodinamika. Postanovka i reshenie zadach v protsessore Fluent* (Setting and solving problems in the Fluent processor: a methodological guide for educational and scientific work), Kazan', Izd-vo Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2013, 81 p.
20. Sankaran S., Ignatius J.K., Ramkumar R. et al. Suppression of high mach number rocket jet noise by water injection, *Journal of Spacecraft and Rocket*, 2009, vol. 46 (26), pp. 1164–1170. DOI: [10.2514/1.43421](https://doi.org/10.2514/1.43421)

Статья поступила в редакцию 09.07.2024

Одобрена после рецензирования 12.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 09.07.2024; approved after reviewing on 12.07.2024; accepted for publication on 28.08.2024