

УДК 534.83

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОФРИРОВАННЫХ СОПЕЛ

© 2023 г. В. Ф. Копьев^а, И. В. Храмцов^б*, Е. С. Черенкова^б, М. Ю. Зайцев^а, Ю. В. Берсенева^а, В. В. Ершов^б, О. Ю. Кустов^б, Р. В. Бульбович^б

^аФАУ ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ,
ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

^бПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр. 29, Пермь, 614990 Россия

*e-mail: lmgsh@pstu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 17.03.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Приводятся результаты исследования снижения шума дозвуковой турбулентной струи за счет использования гофрированной формы сечения сопла. Рассматривались гофрированные сопла с числом гофров от 6 до 12 различной высоты. Эксперименты проводились в двух заглушенных камерах: заглушенной камере с аэродинамическими источниками шума Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ и заглушенной камере с потоком АК-2 ЦАГИ. Звуковое поле дозвуковой струи, истекающей из гофрированного сопла, сравнивалось со звуковым полем эквивалентной круглой струи. В работе демонстрируются способы расширения частотного диапазона, в котором достигается снижение шума струй при использовании гофрированных сопел. Приводится оценка потерь тяги в гофрированных соплах на основе RANS расчета.

Ключевые слова: аэроакустика, шум струи, турбулентная струя, гофрированная форма сопла, заглушенная камера, потери тяги

DOI: 10.31857/S0320791923600397, **EDN:** BAWBXC

ВВЕДЕНИЕ

Шум реактивной струи остается значительным источником шума при взлете самолета [1], и его снижение представляет собой серьезную проблему. Отчасти причина кроется в сложности точного моделирования турбулентности, которая, как известно, является источником шума струи. Тем не менее, давно известно, что мощность шума дозвуковой струи масштабируется как восьмая степень скорости истечения струи [2, 3]. Как следствие, в течение последних нескольких десятилетий основным и, возможно, наиболее эффективным методом снижения шума являлось снижение скорости истечения струи за счет увеличения диаметра авиационного двигателя.

Наиболее распространенным направлением работ для дальнейшего снижения шума струи является изменение конструкции выхлопных устройств двигателей, приводящих к изменению условий истечения струй и их смешения с окружающей средой. В этом случае, в основном, производится интенсификация смешения, что изменяет свойства крупномасштабных вихревых структур и уменьшает длину начального участка струи. К та-

ким методам стоит отнести щелевидные (прямоугольные), шевронные, скошенные и гофрированные сопла [4–10]. Данные методы являются одними из самых эффективных. Кроме того, они являются простыми – обычно не требуется дополнительной аппаратуры, и их применение не приводит к существенному увеличению массы авиационного двигателя.

Шевронные сопла имеют треугольные зубцы вдоль кромки сопла, которые приводят к интенсификации вихреобразования в сдвиговом слое и улучшают смешение потоков. При этом шевроны эффективно снижают шум в области низких частот, но приводят к усилению шума в области высоких частот. В работе [7], например, проведено параметрическое исследование влияния геометрических параметров шевронов (длина шеврона, количество шевронов и их асимметрия) на профиль скорости и излучение шума в дальнем поле. Стоит отметить, что шевроны в настоящее время применяются на реальных авиационных двигателях, как на внутреннем контуре, так и на внешнем.

Другим типом сопла, которое может быть использовано на авиационном двигателе, является

гофрированное сопло. Такие сопла имеют слабую синусоидальную гофрировку в окружном направлении. Исследования влияния на шум струи гофрированной формы сопла, в настоящее время, проводятся на модельных струйных установках [6, 9]. При этом рассматривается только малое число гофр, 4–6. Эффект снижения шума, который удается достичь авторам данных работ, составляет 1–2 дБ в области максимума шума излучения струи, при этом шум на высоких частотах увеличивается так же, как и у шевронных сопел.

Стоит отметить, что изменение формы сопла оказывает влияние на поток и, соответственно, приводит к ухудшению тяговых характеристик сопла [5, 11–17]. Потери тяги при использовании сопел альтернативной формы являются одной из важнейших проблем для их использования в реальных авиационных двигателях. Требуется найти баланс между ухудшением тяговых характеристик и снижением шума. Для определения потерь тяги могут использоваться экспериментальные [15, 16] и расчетные методы [5, 13, 14, 17].

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования шума струй, истекающих из базового конического и различных гофрированных сопел. Эксперименты проводились в двух заглушенных камерах: заглушенной камере с аэродинамическими источниками шума Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ и заглушенной камере с потоком АК-2 ЦАГИ. В работе демонстрируются способы расширения частотного диапазона, в котором достигается снижение шума струй при использовании гофрированных сопел. На основе численного моделирования проводятся исследования потерь тяги в гофрированных соплах.

ОТРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ ШУМА СТРУИ В ЗАГЛУШЕННЫХ КАМЕРАХ ПНИПУ И ЦАГИ ДЛЯ КОНИЧЕСКОГО СОПЛА

Исследования проводились в двух заглушенных камерах, оснащенных струйными установками. Данные установки отличаются способом создания потока. В заглушенной камере ПНИПУ поток создается с помощью двух последовательно соединенных вентиляторов [18]. Для предотвращения проникновения шума вентилятора в заглушенную камеру в сети воздухопроводов предусмотрены глушители. В заглушенной камере АК-2 ЦАГИ для создания потока используется хранящийся в газгольдерах сжатый воздух.

Для повышения качества результатов, отработка измерений проводилась с использованием одного и того же конического сопла, которое последовательно использовалось в обеих заглушенных камерах. Сопло имело следующие параметры:

диаметр среза сопла 50 мм; диаметр входа 64 мм; длина 64 мм.

Перед проведением экспериментов производилась настройка систем, создающих поток. Для этого устанавливались трубки Пито–Прандтля на расстоянии 1 калибра от среза сопла по центру потока, и подбирались параметры подвода воздуха, чтобы скорость в данной точке составляла 0.6М.

Для исследования шума струи использовались 6 микрофонов, расположенных на расстоянии $R = 2$ м от среза сопла под углами наблюдения $\alpha = 15^\circ - 90^\circ$ с равным шагом между микрофонами. Схема и фотографии экспериментов представлены на рис. 1. При измерениях в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ использовались полудюймовые микрофоны Briel & Kjaer, тип 4189С. При измерениях в заглушенной камере ПНИПУ использовались четвертьдюймовые микрофоны Briel & Kjaer, тип 4958. Для снижения эффектов отражения струи от вертикальных стоек, микрофоны располагались на тонких державках длиной 30 см. Перед началом измерений производилась калибровка микрофонов с помощью пистонфона тип 4228 (Briel & Kjaer).

На рис. 2 представлено сравнение спектральной плотности мощности шума струи под 3 различными углами наблюдения, при одной и той же скорости истечения струи. Как можно увидеть, полученные результаты на двух струйных установках хорошо соответствуют друг другу. Отличие результатов не превышает 1 дБ и может быть объяснено погрешностями измерения скорости струи и различной конфигурацией воздухопроводов установок.

СНИЖЕНИЕ ШУМА СТРУИ ЗА СЧЕТ ГОФРИРОВАННОЙ ФОРМЫ СОПЛА

Выполнены исследования влияния числа гофров и их высоты на шум турбулентной струи. Гофрированные сопла имели в области среза сопла синусоидальную гофрировку с необходимым числом гофр и их высотой. Гофрировка плавно уменьшалась в направлении входа в сопло. На входе в сопло геометрия была эквивалентна базовому коническому соплу. Были спроектированы сопла с одинаковой высотой лепестка 3 мм и различным числом лепестков 6; 9; 12; и для варианта с 12 лепестками дополнительно были изготовлены сопла с высотой лепестка 1.5 и 4.5 мм. При проектировании уделялось особое внимание сохранению площади среза сопла. У всех гофрированных сопел она была равна площади среза базового конического сопла. Общая длина всех гофрированных сопел также была равна длине базового сопла.

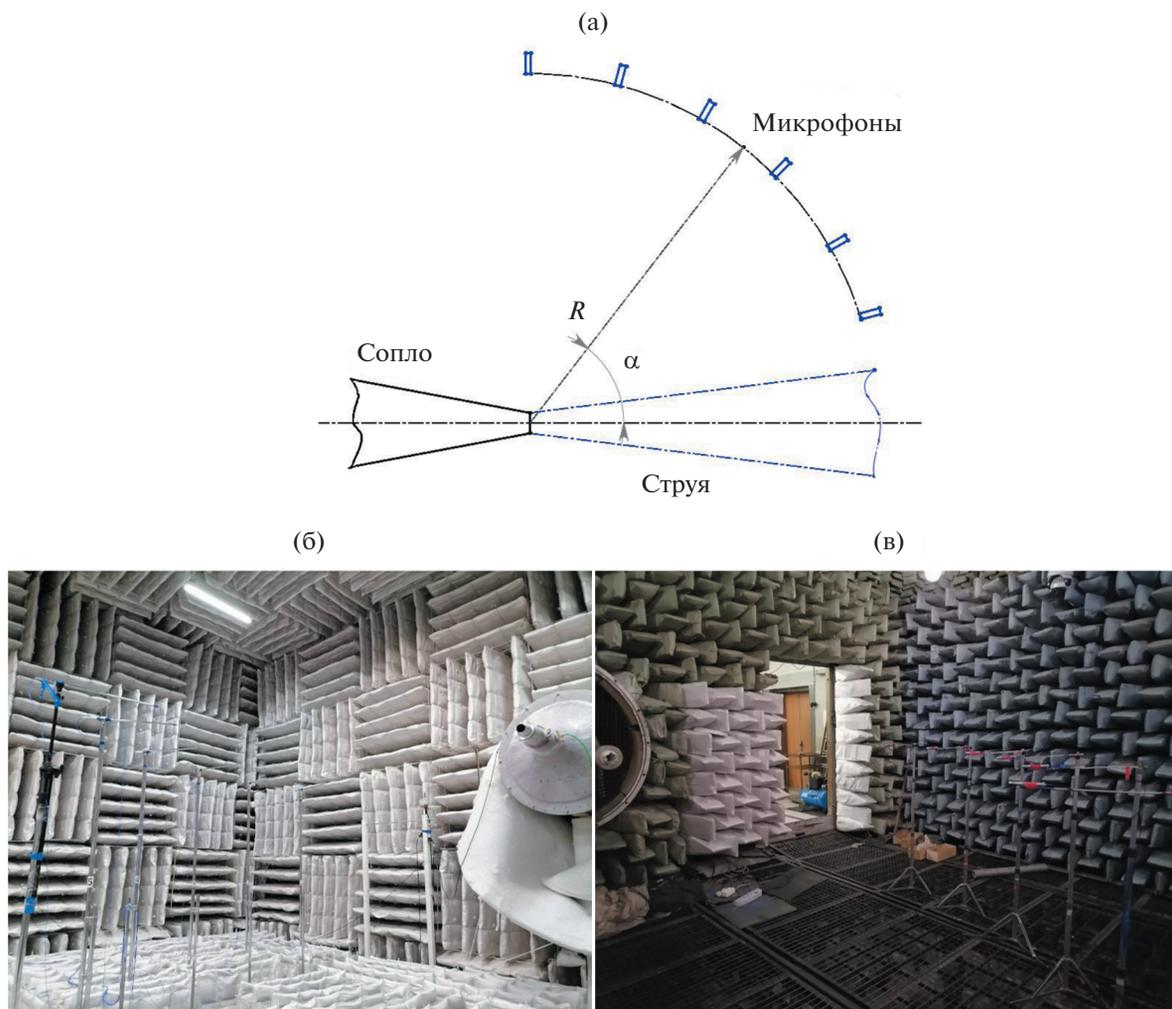


Рис. 1. Схема и фотографии проведения эксперимента: (а) – схема установки микрофонов, (б) – измерения в заглушенной камере ПНИПУ, (в) – измерения в заглушенной камере ЦАГИ.

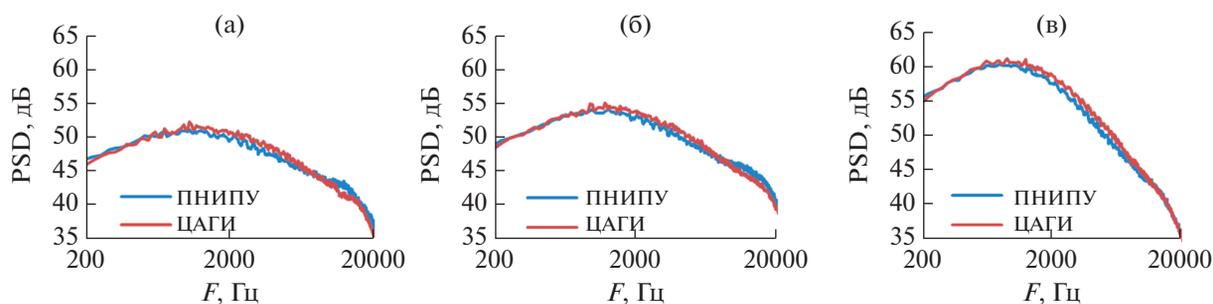


Рис. 2. Сравнение результатов измерений для конического сопла: (а) – угол наблюдения 90°, (б) – угол наблюдения 60°, (в) – угол наблюдения 30°.

Такая геометрия является достаточно сложной для традиционных методов изготовления, поэтому в данной работе использовались аддитивные технологии для создания сопел [19]. Созданные на 3D принтере из материала ПЭТ сопла пред-

ставлены на рис. 3. Измерения проводились для одних и тех же сопел в заглушенных камерах ПНИПУ и АК-2 ЦАГИ.

Акустические измерения проводились при условиях, описанных в разделе 1 данной статьи.

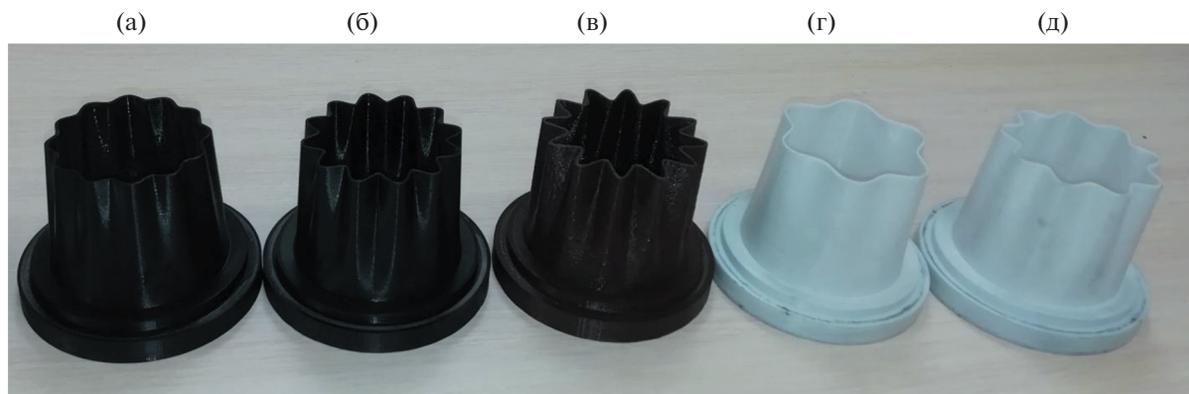


Рис. 3. Созданные сопла: (а) – 12 лепестков высотой 1.5 мм, (б) – 12 лепестков высотой 3 мм, (в) – 12 лепестков высотой 4.75 мм, (г) – 6 лепестков высотой 3 мм, (д) – 9 лепестков высотой 3 мм.

В результате были получены спектры шума струй, истекающих из различных сопел. Для анализа эффективности снижения шума струи с помощью данных сопел проводилась количественная оценка снижения шума:

$$\Delta L = L_{\text{гофрированное}} - L_{\text{коническое}},$$

где $L_{\text{гофрированное}}$ – выраженный в дБ уровень звукового давления струи, истекающей из гофрированного сопла; $L_{\text{коническое}}$ – выраженный в дБ уровень звукового давления струи, истекающей из конического сопла.

На рис. 4 представлены результаты измерений шума в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Как можно увидеть, сопло с 6 лепестками снижает шум в области максимума струи, и происходит увеличение шума на высоких частотах. Увеличение числа лепестков приводит к расширению частотного диапазона снижения шума. Увеличение амплитуды гофров приводит к плавному нарастанию эффекта снижения шума. Аналогичные результаты были получены при измерениях в заглушенной камере ПНИПУ.

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ТЯГИ В ГОФРИРОВАННЫХ СОПЛАХ

Движение летательного аппарата с реактивным двигателем осуществляется под воздействием реактивной силы (реактивной тяги), которая возникает в результате истечения из реактивного сопла выходящих газов. В идеальном случае при расчетах течения в сопле процесс считают адиабатическим и изоэнтропическим. В реальных соплах процесс расширения газа в сопле является достаточно сложным и сопровождается наличием различных потерь (на трение, неравномерность, коничность потока в выходном сечении сопла и др.). Использование различных устройств по снижению шума струй приводит к увеличению потерь тяги сопел. В работе [11] указано, что потери тяги

в соплах с шумоглушением могут быть в несколько раз больше, чем в обычных круглых (стандартных) соплах. Уровень потерь в некоторых случаях может достигать пяти и более процентов.

Количественная оценка потерь тяги в соплах производится с помощью выражения:

$$\Delta \bar{P}_c = 1 - \bar{P}_c, \quad (1)$$

где $\bar{P}_c = P/P_{c_{ид}}$ – коэффициент тяги сопла, связанный с эффективностью преобразования энергии давления в кинетическую энергию газов; P – тяга сопла, измеренная в эксперименте или полученная с помощью численного моделирования; $P_{c_{ид}}$ – идеальная тяга сопла.

Выражение для идеальной тяги, соответствующей идеальному процессу расширения газов (адиабатическому, изоэнтропическому) или истечению газов из идеального сопла, т.е. идеальной тяги, определенной по идеальному расходу газа через сопло, имеет вид:

$$P_{ид,м} = G_{ид} V_{ид}.$$

Полученную с помощью данного выражения идеальную тягу по значениям идеального расхода $G_{ид}$ и идеальной скорости истечения $V_{ид}$ можно охарактеризовать как теоретическую. Идеальный расход газа в выходном сечении сопла определяется выражением:

$$G_{ид} = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{Fq(\lambda)p_0}{\sqrt{T_0}}},$$

где k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная; F – площадь среза сопла; $q(\lambda)$ – приведенный расход; p_0 – давление торможения; T_0 – температура торможения.

Идеальная скорость истечения:

$$V_{ид} = \lambda \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0},$$

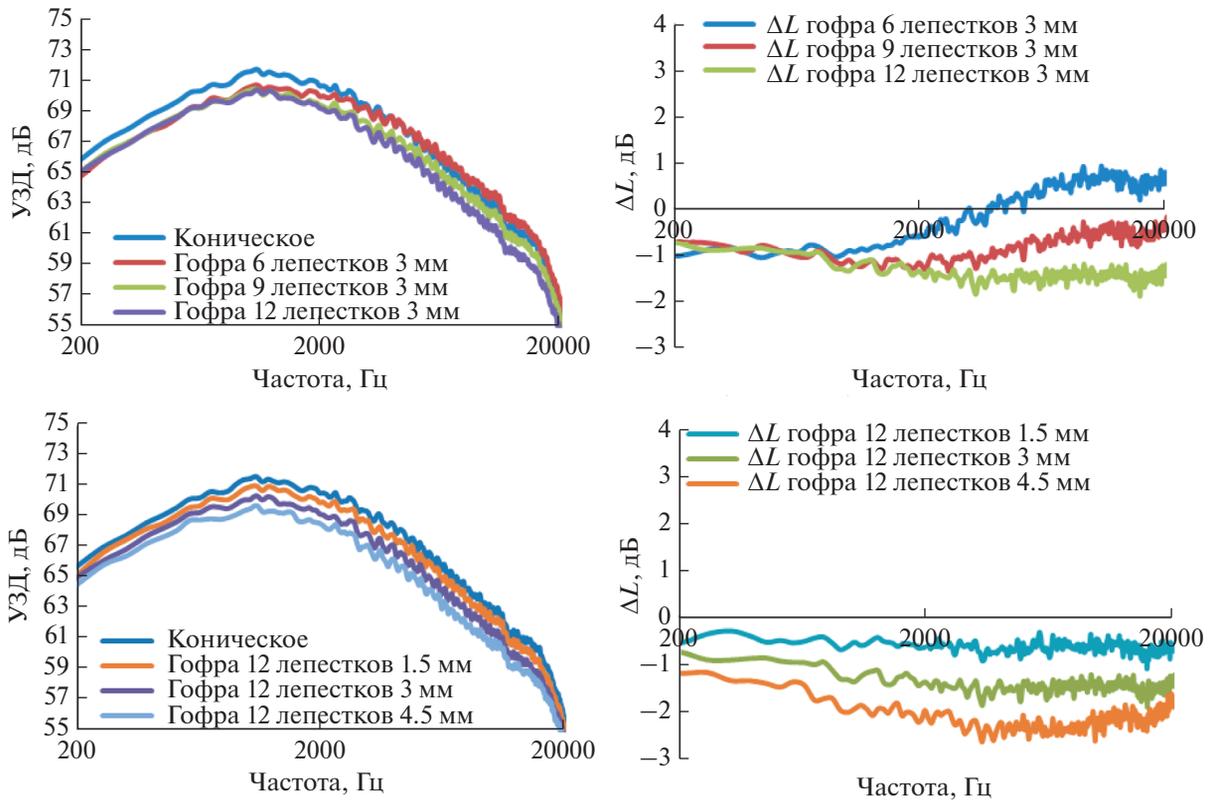


Рис. 4. Спектры шума и эффективность снижения шума гофрированными соплами под углом наблюдения 90° .

где λ – приведенная скорость истечения газа из сопла.

В реальных соплах тяга зависит также от пропускной способности сопла, которая характеризуется коэффициентом расхода сопла:

$$\mu_c = G / G_{ид}, \quad (2)$$

где G – расход газа, измеренный в эксперименте или полученный с помощью численного моделирования. Идеальная тяга с учетом действительного расхода газа через сопло определяется выражением:

$$P_{сид} = \mu_c P_{идм} = \mu_c G_{ид} V_{ид}.$$

В данной работе для определения действительного расхода газа в соплах G и тяги P использовалось численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) в программном комплексе Ansys Fluent. Для замыкания системы уравнений использована модель турбулентности SST. Данная модель турбулентности некорректно предсказывает среднее поле течения струи, однако позволяет прогнозировать коэффициент потери тяги с точностью, близкой к разбросу экспериментальных данных [13, 17]. Расчеты проводились с учетом сжимаемости потока.

Расчетная область представляла собой внутреннюю область сопла и внешнюю область, в которой распространялась струя. Расчеты проводи-

лись для 10 моделей сопел. В качестве базового использовалось коническое сопло, геометрические параметры которого совпадали с используемым в эксперименте. В качестве шумоглушащих сопел использовались гофрированные сопла с числом гофр 6, 9, 12. В расчетах варьировалась высота гофр от 1.5 до 4.5 мм. Площадь среза сопла была одинаковой для всех сопел. Длина сопла и диаметр входа были аналогичны коническому соплу. Внешние границы расчетной области были удалены от среза сопла на 12 калибров вдоль оси сопла и 5–6 калибров в перпендикулярном направлении. Для экономии вычислительных ресурсов расчеты проводились для 1/3 части сопла в окружном направлении. Схема расчетной области и граничных условий представлена на рис. 5.

На входе в сопло (граница 1) задавались параметры заторможенного потока p_0 и T_0 . Расчеты проводились для трех значений скорости струи 0.3M, 0.6M и 0.9M. Давление p_0 на входе в расчетную область определялось в зависимости от числа Маха M для адиабатического изэнтропического процесса расширения газа. Температура T_0 для всех расчетов составляла 300 K. На выходе из расчетной области (граница 2) использовались значения $p_c = 1$ атм и температура $T_c = 300$ K. Для расчета параметров струи в неподвижной среде обычно используется струйное течение в спутном

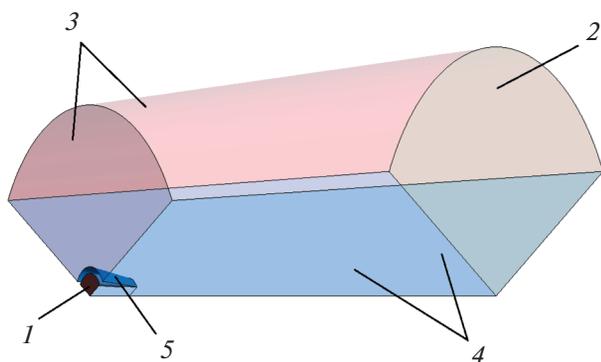


Рис. 5. Схема расчетной области. Описание приведено в тексте.

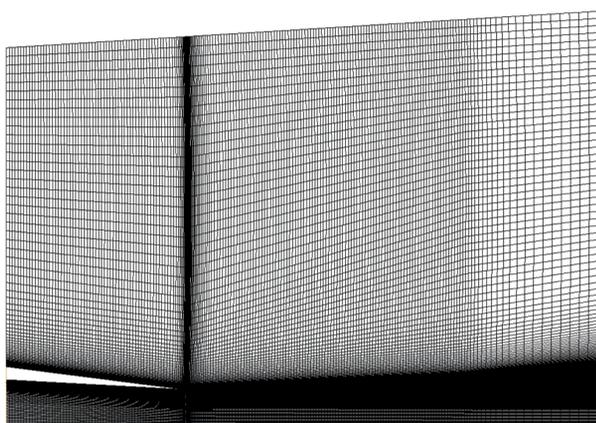


Рис. 6. Особенности сеточной модели.

потоке малой скорости. Для реализации этого условия на границе 3 задавалось значение скорости внешнего спутного потока с числом $M_\infty = 0.025M$. На боковых границах 4 использовалось

условие периодичности. Граница 5 представляла собой жесткую стенку.

Сетка содержит сгущения в сечении выхода из сопла, вблизи сопла на расстоянии 4 калибров по потоку и в окрестности слоя смешения турбулентной струи (рис. 6). Элементы вблизи стенки имеют сгущение для корректного разрешения поперечного градиента скорости. Параметры выбраны таким образом, чтобы обеспечить величину безразмерного расстояния до стенки $y^+ = \frac{U_\tau y}{\nu} < 1$, где U_τ – динамическая скорость; y – расстояние от первого узла сетки до стенки; ν – кинематическая вязкость. Первый пристеночный элемент имел высоту 0.5 мкм, высота последующих элементов увеличивалась в геометрической прогрессии с коэффициентом 1.05. За пределами сопла блок с пристеночными элементами расширяется под углом 8° , обеспечивая качественное разрешение слоя смешения.

При больших высотах лепестков гофрированных сопел с использованием топологии O-grid возникают ячейки с большой скошенностью. Для повышения качества сетки была разработана топология, позволяющая повысить ее качество. Примеры сеточных моделей для гофрированных сопел с малой и большой высотой лепестков представлены на рис. 7. Число элементов в сеточной модели для конического сопла составляло $\approx 4.3 \times 10^6$, для гофрированных сопел с малой высотой лепестков $\approx 5.1 \times 10^6$, для гофрированных сопел с большой высотой лепестков $\approx 12.3 \times 10^6$.

В результате расчета интегрированием по поверхности среза сопла определялись значения расхода и тяги:

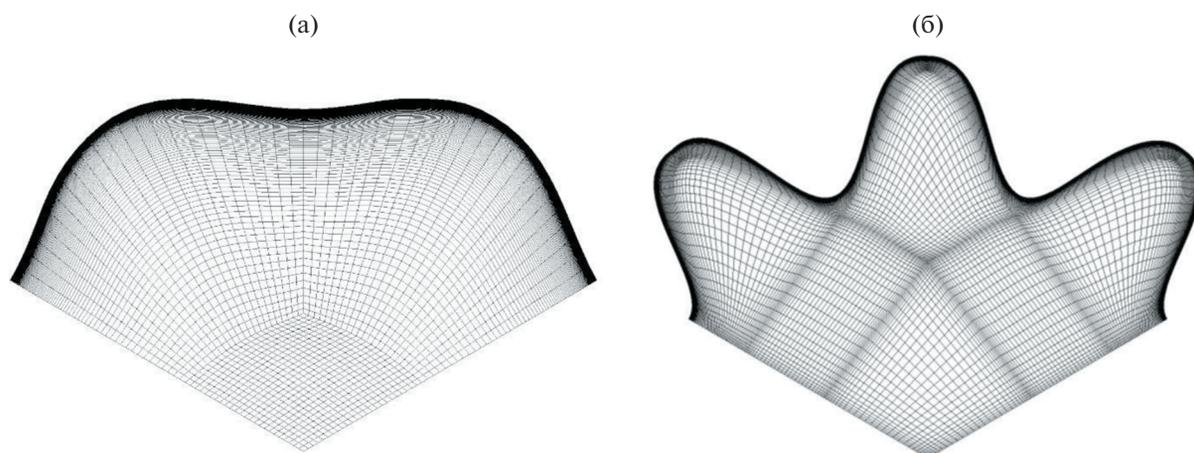


Рис. 7. Сеточная модель гофрированных сопел (а) – с малой высотой лепестков, (б) – с большой высотой лепестков.

$$G = G_{\text{расч}} = \iint_F \rho u dF,$$

$$P = P_{\text{расч}} = \iint_F (p - p_c + \rho u^2) dF,$$

где $G_{\text{расч}}$ и $P_{\text{расч}}$ – расход и тяга сопла, полученные по результатам расчета; ρ – плотность; u – скорость; p – давление на срезе сопла. Полученные в результате расчета значения расхода и тяги использовались в выражениях (1) и (2) для определения коэффициентов расхода и тяги.

На рис. 8 представлены результаты определения потерь тяги в сопле в зависимости от безразмерного размера $D_{\text{гидр}}/D_{\text{экв}}$, где $D_{\text{гидр}}$ – гидравлический диаметр сопла, определяемый с помощью отношения четырех площадей F к периметру сопла; $D_{\text{экв}}$ – диаметр базового конического сопла. Как можно увидеть, с ростом числа лепестков и их размеров происходит увеличение потерь тяги. Меньшие значения скорости струи приводят к большему значению потерь тяги. Если оценивать изменение потерь тяги относительно базового конического сопла, то для всех значений скорости струи приращение потерь для сопла с 12 лепестками гофр и высотой 4.5 мм относительно конического сопла составляет 0.4–0.6%.

Для проведения акустических испытаний шумоглушащих сопел требуется обеспечение равной тяги с эквивалентным базовым соплом. Равную тягу можно обеспечить изменением скорости истечения струи. Однако, в простейшем случае тяга пропорциональна квадрату скорости истечения. Для компенсации 0.5% тяги с помощью увеличения скорости истечения потребуется изменять скорость менее чем на 1 м/с. Однако, такую точность изменения скорости сложно обеспечить в натурном эксперименте. Стоит также отметить, что в соответствии с законом “восьмой степени” уровень шума дозвуковой струи масштабируется как восьмая степень скорости истечения струи или четвертая степень тяги. Соответственно, изменение тяги на 0.5% будет приводить к изменению шума струи менее 0.1 дБ.

В данной работе гофрированное сопло с 12 лепестками высотой 4.5 мм обеспечило снижение шума в среднем по частотному диапазону 20–20000 Гц на 2 дБ при скорости истечения струи 0.6М. Для того чтобы полученный эффект объяснялся только потерями тяги, они должны составлять 12.2%. Соответственно, можно сделать вывод, что снижение шума струй, истекающих из гофрированных сопел, обеспечивается в большей степени изменением структуры течения, а не изменением тяги, однако физический механизм, за счет которого происходит снижение шума, не ясен и требует дальнейшего изучения.

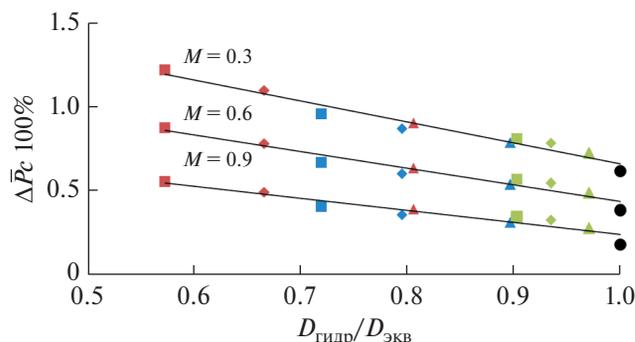


Рис. 8. Потери тяги различных сопел: круг – круглое сопло, треугольник – 6 лепестков, ромб – 9 лепестков, квадрат – 12 лепестков, зеленый – 1.5 мм, синий – 3 мм, красный – 4.5 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты совместных измерений одних и тех же сопел в заглушенных камерах ПНИПУ и АК-2 ЦАГИ. Полученные спектры на двух установках отличаются не более чем на 1 дБ. Спроектированы и созданы гофрированные шумоглушащие сопла с различным количеством лепестков и их амплитудой. Проведены параметрические исследования шума струи, истекающей из гофрированных сопел. Экспериментально подтвержден результат, демонстрирующий, что при увеличении амплитуды гофров, при сохранении площади выходного сечения сопла и скорости истечения, усиливается эффект снижения шума турбулентной струи. Получено, что при увеличении числа гофров увеличивается частотный диапазон снижения шума. Использование гофрированных сопел с увеличенным количеством лепестков и их амплитудой позволяет обеспечить снижение шума струи до 2–3 дБ в диапазоне частот 20–20000 Гц.

Проведена оценка потерь тяги при использовании гофрированных сопел. Эффект потери тяги при использовании шумоглушащих сопел определялся на основе RANS расчета течения газа через сопло. Увеличение количества лепестков и высоты гофров приводит к ухудшению тяговых характеристик сопел. Однако, снижение шума струй, истекающих из гофрированных сопел, обеспечивается в большей степени изменением структуры течения, а не изменением тяги.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 22-72-00063). Работа выполнена на базе УНУ “Акустическая заглушенная камера с аэродинамическими источниками шума” ФГАОУ ВО “ПНИПУ” и УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ “ЦАГИ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P.* An overview of aircraft noise reduction technologies // *J. Aerospace Lab.* 2014. V. 7. P. 1–15.
2. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically. I. General theory // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1952. V. 211. № 1107. P. 564–587.
3. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically: II. Turbulence as a source of sound // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1954. V. 222. P. 1–32.
4. *Кузнецов В.М.* Основы теории шума турбулентных струй. М.: Физматлит, 2008. 240 с.
5. *Алексенцев А.А., Бекурин Д.Б., Власов Е.В., Иноземцев А.А., Лаврухин Г.Н., Падучев А.П., Умпелева О.А.* Исследование характеристик сопла ТРДД с регулируемыи шевронами // *Ученые записки ЦАГИ.* 2009. № 6.
6. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н.* Снижение шума дозвуковой струи за счет гофрированной формы сопла // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. С. 232–234.
7. *Bridges J., Brown C.A.* Parametric testing of chevrons on single flow hot jets // *Proceedings of the 10th Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, 2004.* 2824 p.
8. *Ershov V.V., Khrantsov I.V.* Study of the Position of Sound Sources in a Turbulent Jet Using Nozzles of Different Configurations // *МАТЕС Web of Conferences.* 2020. V. 320. P. 00027.
9. *Lyu B., Dowling A.P.* An experimental study of the effects of lobed nozzles on installed jet noise // *Exp. Fluids.* 2019. V. 60. P. 1–12.
10. *Кузнецов В.М.* Эффективность методов снижения шума реактивных струй пассажирских самолетов // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 1. С. 91–102.
11. *Лаврухин Г.Н.* Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. I. Внутренние характеристики сопел. М.: Физматлит, 2003. 375 с.
12. *Vlasov E.V., Ginevskii A.S., Karavosov R.K., Makarenko T.M., Nalivaiko A.G.* Decrease in the noise of a subsonic turbulent jet ejected from a ring nozzle with longitudinal slots // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2006. V. 79. № 3. P. 503–505.
13. *Vlasenko V., Bosniakov S., Mikhailov S., Morozov A., Trohin A.* Computational approach for investigation of thrust and acoustic performances of present-day nozzles // *Prog Aerosp Sci.* 2010. V. 46. P. 141–197.
14. *Браилко И.А., Крашенинников С.Ю.* Исследование аэродинамических характеристик шевронных сопел на основе численного расчета течения // *МЖГ.* 2005. № 2. С. 76–88.
15. *Krashenninikov S.Ju., Mironov A.K., Pavlyukov E.V., Shenkin A.V., Zhitenev V.K.* Mixer-ejector nozzles: acoustic and thrust characteristics // *Int. J. Aeroacoustics.* 2005. V. 4(3). P. 267–288.
16. *Лаврухин Г.Н., Талызин В.А.* Экспериментальные исследования сопел до- и сверхзвуковых самолетов // *Ученые записки ЦАГИ.* 2014. Т. 45. № 5. С. 18–32.
17. *Горбовской В.С., Кажан А.В., Кажан В.Г., Шенкин А.В.* Исследования тяговых характеристик сопла сверхзвукового пассажирского самолета с помощью методов вычислительной газовой динамики // *Вестник Московского авиационного института.* 2019. Т. 26. № 4. С. 7–16.
18. *Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храпцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю.* Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 1. С. 114–126.
19. *Khrantsov I.V., Cherenkova E.S., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu.* On applicability of additive technology in producing nozzles for jet noise investigations // *Akustika.* 2019. V. 34. P. 180–184.