

УДК 532.525.2:517.4:534.83

© 2003 г. С. Ю. КРАШЕНИННИКОВ, А. К. МИРОНОВ

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЗАВИХРЕННОСТИ,
ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ В ИСТОЧНИКЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ,
НА ЕЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Изложены результаты анализа экспериментальных исследований воздействий на шум турбулентных струй, реализуемых с помощью сопловых насадков различных конфигураций. Рассмотрены цилиндрические насадки в компоновке из четырех насадков; лепестковые насадки и “шевронные” сопла. Проведено сопоставление уменьшения акустомеханического КПД (снижения акустической мощности) струй для разных способов воздействия.

Показано, что воздействия на струю лепестковых и компоновок цилиндрических насадков, а также шевронов имеют общее свойство, которое обусловлено возникновением завихренности в источнике струи и может быть описано на основании единого критерия, характеризующего воздействие на структуру течения в струе и излучаемый ею шум.

Ключевые слова: турбулентные струи, шум турбулентных струй, акустомеханический КПД, сопловые насадки, продольная компонента завихренности, воздействие на турбулентность.

Выхлопные струи авиационных двигателей являются мощным источником акустического излучения, как широкополосного, так и тонального. В связи с этим задача уменьшения их шума по-прежнему остается актуальной.

Проблема снижения шума реактивных струй летательных аппаратов неразрывно связана с необходимостью исследования самой природы шумообразования в турбулентных струях [1]. Считается, что уменьшить шум струи можно воздействуя на ее структуру течения. Для этого могут быть использованы многотрубчатые и лепестковые насадки, рассекатели, поперечный вдув в струю [1–4]. Действительно, такое грубое воздействие на струю обычно приводит к снижению ее акустической мощности. Однако поиск возможности повышения эффективности такого воздействия, например, по соотношению: потери тяги – снижение акустической мощности, как правило, носит интуитивный характер. В [5–6] определены характеристики различных лепестковых насадков, снижающих шум реактивной струи, сформулировано, что чем больше возмущено поле течения в струе, тем больше эффект снижения шума (при определенных ограничениях). Это соответствует значительным потерям тяги при использовании таких устройств [3] (наилучшее достигнутое соотношение 3 дБ на 1% потерь тяги).

Однако результаты исследований воздействия на шум струи с помощью “шевронных сопел” [7–10] показывают, что заметные эффекты снижения шума могут иметь место и при весьма слабом воздействии на струю, когда возникающие потери тяги сопла столь незначительны, что их трудно измерить [7].

Экспериментальные исследования сравнительного уровня шума струй, распространяющихся из обычного сопла и сопел с шевронами [11], показали, что при относительно слабом воздействии на струю шевронов, продолжающих образующую контура слабokonического сопла, можно получить снижение широкополосного шума струи на 1.5–2 дБ (при этом подавляется и тональный шум струи).

Накопленный опыт исследования воздействия на шум струи с помощью лепестковых [1–4] и многотрубчатых [4, 12] насадков и шевронных сопел [11] позволил с единых позиций проанализировать эффекты воздействия на течение в струях и их акустические характеристики. Соответствующий анализ и является предметом настоящего исследования. Его основным результатом является установление гидродинамического параметра – продольной компоненты завихренности, формирующейся на срезе соплового устройства, который и характеризует воздействие на течение в струе и изменение ее акустических свойств. Этот эффект можно объяснить воздействием завихренности на структуру течения и турбулентности.

1. В [3–6, 11, 12] изложены результаты экспериментальных исследований акустических характеристик турбулентных струй при различных воздействиях на течение в струе. Данные этих измерений, характеризующих мощность акустического излучения, его диаграммы направленности и спектральный состав, использованы для анализа сопутствующих гидродинамических эффектов при рассматриваемых воздействиях на течение в струе. Хотя при этом трансформируются все указанные характеристики акустического поля, рассматриваются только изменения суммарной акустической мощности W_{ac} , величина которой определяется интегрированием диаграммы направленности для всего диапазона частот излучения шума.

При анализе будет использовано понятие акустомеханического КПД η , определяемого как

$$\eta = W_{ac} W_{aerod}^{-1} \quad (1.1)$$

Здесь W_{ac} – суммарная мощность акустического излучения

$$W_{aerod} = \rho u_0^3 F$$

где ρ – плотность газа струи, u_0 – скорость истечения, F – площадь сопла (соплового насадка).

Для турбулентных струй, истекающих из осесимметричных сопел, значения акустомеханического КПД можно считать установленными на основании многочисленных экспериментов.

Для турбулентных струй при значениях числа Маха $M < 2$

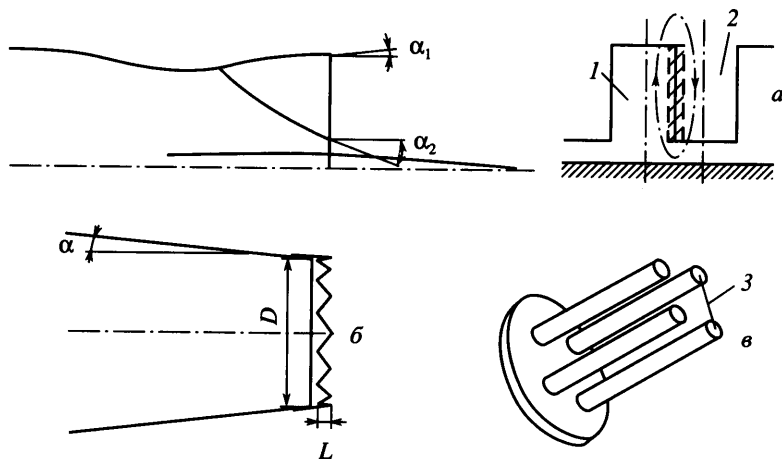
$$\eta = \beta M^5 \quad (1.2)$$

Согласно [1], величина $\beta_0 \cong 0.9 \cdot 10^{-4}$.

При анализе изменения акустомеханического КПД в случае различных воздействий рассматривается отклонение величины β от значения β_0 .

Однако исходные значения величины β_0 , измеренные при разных условиях, могут заметно отличаться друг от друга по множеству причин, которые здесь не обсуждаются. В связи с этим при экспериментах, в которых определялись эффекты воздействия на шум струи, всегда одновременно измерялись акустические характеристики эталонной осесимметричной струи и анализировалась разница акустических мощностей исследуемой и эквивалентной эталонной струй.

Акустическая мощность эквивалентной эталонной струи определялась пересчетом по площади выходного сечения сопла измеренной акустической мощности эталонной струи. При этом площадь выходного сечения сопла эталонной струи всегда была близка (с точностью 20–30%) к площади среза исследуемого соплового насадка. Исследования акустических характеристик проводились на открытом акустическом стенде. Параметры истечения струи варьировались в диапазонах: температура 300–650 К, отношение полного давления к давлению в окружающей среде $P_n = 1.4$ –2.5. Измерены диаграммы



Фиг. 1. Схемы исследованных моделей сопел: *a* – восьмилепестковое плоское сопло с центральным телом в двух проекциях: 1 – лепесток, 2 – карман; *б* – шевронные сопла: $\alpha = 6^\circ$, $L = 10\text{--}20$ мм, $D = 100$ мм; *в* – четырехтрубчатый насадок: 3 – расстояние между центрами трубок 1

направленности для углов $30\text{--}120^\circ$ по отношению к оси струи и спектры шума в диапазоне 20 Гц – 50 кГц.

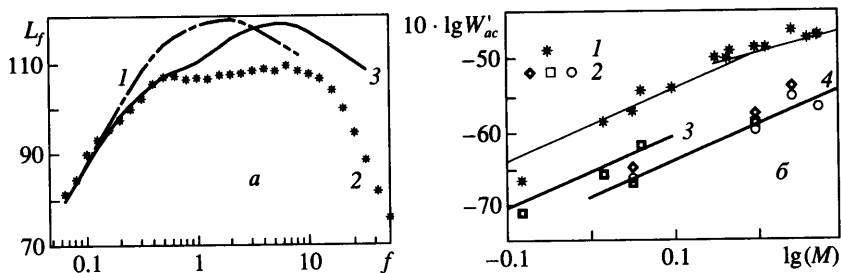
2. Схемы объектов исследования представлены на фиг. 1: *a*) лепестковые сопловые насадки в компоновке с плоским центральным телом; *б*) компоновки многотрубчатых насадков при вариации взаимного расположения трубок (расстояния между ними); *в*) шевронные сопла, с шевронами различной длины и углами наклона к оси сопла.

В этом разделе использованы данные экспериментальных исследований, посвященных определению возможностей снижения шума реактивной струи на 10–15 дБ [3–6]. Указанный уровень снижения шума может быть достигнут при совместном использовании лепестковых сопловых насадков и эжектора (схема миксер–эжектор). Воздействие эжектора не рассматривается, и для анализа использованы данные экспериментов, при которых определялись акустические характеристики струй, распространяющихся из лепестковых сопел.

На фиг. 2, *a* приведен спектр шума струи, распространяющейся из восьмилепесткового насадка, в сравнении со спектром шума осесимметричной струи с той же характерной площадью выхода и при тех же параметрах истечения для направления $\theta = 30^\circ$ по отношению к направлению оси струи. Можно видеть, что интегралы уровней звукового давления для лепесткового сопла меньше, чем для обычного сопла. Аналогичные данные имеют место и при других углах направления излучения шума. Это свидетельствует об общем снижении акустомеханического КПД при использовании лепестковых насадков.

Анализ данных о снижении акустомеханического КПД для различных моделей лепестковых сопел и при разных режимах истечения струй ($T = 300\text{--}700$ К, $P_n = 1.5\text{--}3.5$) приведен в [4]. На фиг. 2, *б* итоговый график проведенных сопоставлений значений акустомеханического КПД для лепестковых сопел показывает, что наблюдаемое его снижение весьма значительно.

Для объяснения этого эффекта нужен специальный анализ, требующий привлечения не только экспериментальных данных, но и результатов расчета течения в струе за лепестковым соплом и оценок шума на основании различных моделей.



Фиг. 2. Результаты определения акустических характеристик лепестковых сопел: *a* – уровни звукового давления в третьоктавных полосах частот L_f для угла $\theta = 30^\circ$: 1 – осесимметричная струя; 2 – струя из лепесткового сопла; 3 – гипотетический шум струи при сохранении акустомеханического КПД; *б* – зависимость акустической мощности струй от числа Маха скорости истечения $M = u_0/a_0$, угол наклона параллельных линий соответствует M^5 ($w' = w_{ac}/(\rho u_0^3 D^2)$): 1 – осесимметричные струи; 2 – струи из лепестковых сопел; 3 – ненагретые струи; 4 – горячие струи

В [4–6] изложены результаты экспериментального исследования шума струй за лепестковыми насадками с одновременным расчетным анализом структуры течения и акустических характеристик.

Проведены всесторонние исследования характеристик струй, распространяющихся из сопла, показанного на фиг. 1, *a*, как акустических, так и газодинамических. Результаты измерений сравнивались с расчетами.

Для получения при расчете адекватных акустических характеристик течения, необходимо, чтобы параметры течения в струе в достаточной степени соответствовали экспериментальным данным [13]. Поскольку уравнения движения в [5] записаны в приближении пограничного слоя, распределения в начальном сечении задавались без учета скоса потока, который имеет место в реальных условиях. Действительно, если обратиться к фиг. 1, *a*, где представлена схема лепесткового насадка, можно видеть, что поток должен быть направлен вверх под углом к продольной оси в лепестке, а втекающий в струю через карман между лепестками наружный поток – немного вниз. В реализованном в расчете подходе вместо решения задачи о распределении начальных параметров с учетом указанных эффектов задавалась начальная завихренность χ , характеризующая интенсивность перетеканий в поперечном сечении струи (т.е., в плоскости, перпендикулярной продольной оси)

$$\chi = \left[\frac{\partial}{\partial y}(\rho u w) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho u v) \right] (\rho u)^{-1} \quad (2.1)$$

При расчетах на линии кромки лепестков задавалось значение χ , которое соответствовало значению циркуляции $\Gamma = 0.12 u_0 D$. Здесь циркуляция Γ определена как

$$\Gamma = \int_s \chi dy dz \quad (2.2)$$

Интеграл берется по площади внутри контура, включающего в себя 1/2 лепестка и кармана.

Результаты расчетов могут претендовать только на качественное описание рассматриваемых эффектов. Тем не менее из данных расчетов и экспериментов [5] следует, что наличие в исходном сечении струи завихренности с направлением вектора $\text{rot } \mathbf{u}$

вдоль оси течения приводит к более интенсивному смешению в струе и снижению потока энергии турбулентности, величина которого в модели локальных источников определяет мощность акустического излучения.

Отсюда можно сделать вывод, что если бы при экспериментах использовалось лепестковое сопло с цилиндрическими образующими, возникновение продольной завихренности было бы незначительным и заметного снижения акустической мощности струи не наблюдалось. Имело бы место главным образом изменение спектра излучения.

Косвенно, слабость воздействия, обусловленного продольной завихренностью, при использовании лепестковых сопел с цилиндрическими образующими, подтверждают данные раздела 5 (см. ниже) и [4], где сопоставлены расчеты течения в струе (по описанной методике) и опытных данных, полученных по измерениям за четырехлепестковым цилиндрическим насадком. В этом случае расчет согласовался с экспериментом без введения начальной завихренности.

При экспериментальных исследованиях обычных лепестковых сопел из-за взаимного скоса потока в карманах и лепестках практически всегда присутствует начальная завихренность и акустомеханический КПД изменяется.

Возникновение продольной завихренности при истечении из лепесткового сопла связано с наличием взаимного скоса потоков по разные стороны кромок лепестков (карманов). Если обратиться к схеме лепесткового сопла на фиг. 1,а, то видно, что поток, распространяющийся из лепестка (1), имеет составляющую скорости, направленную вверх, а поток вытекающий из кармана (2), направленную вниз. Угол между этими двумя направлениями α_{12} меняется вдоль контура среза лепестков и карманов, но приблизительно его можно оценить как

$$\alpha_{12} = k\alpha \quad (2.3)$$

где α – конструктивный угол между верхней и нижней образующими лепестка и кармана, k – коэффициент порядка единицы.

В результате в лепестке и кармане реализуются конечные значения поперечных скоростей v и w . Оценочное значение для разности поперечных скоростей вблизи вертикальной стенки лепестка

$$\Delta v_m = u \cdot \operatorname{tg} \alpha_{12} \quad (2.4)$$

Это значение Δv_m можно использовать при оценке завихренности χ , создаваемой в начальном сечении.

Величина завихренности χ характеризуется величиной циркуляции в соответствии с (2.1) и (2.2)

$$\Gamma = \left(\int_s \rho u w dz + \int_s \rho u v dy \right) (\rho u)^{-1}$$

Интеграл от циркуляции по всем лепесткам или полностью по лепестку обращается в ноль. Характерным значением является циркуляция Γ_i , создаваемая половиной лепестка и кармана, т.е. значение циркуляции в каждом из двух парных вихрей, формирующихся на кромках лепестка (кармана).

Сводя интегрирование по всему контуру в области интегрирования, показанной на фиг. 1,а, по линиям симметрии лепестка и кармана, и, пренебрегая изменением ρu и w , получим

$$\Gamma_i \approx \int_L \Delta v dl \quad \text{или} \quad \Gamma_i = \Delta v_m L \quad (2.5)$$

где L – длина стенки лепестка.

Если суммировать циркуляцию по всему контуру сопла, то она будет иметь нулевое значение. Характерным значением циркуляции, определяющим общую интенсивность вторичных течений, будет

$$\Gamma_{\Sigma} = \sum_1^n \text{abs}(\Gamma_i)$$

Относительная интенсивность вторичных течений в каждом выделенном элементе есть

$$\gamma_i = \frac{\Gamma_i}{u d_i} \quad \text{или} \quad \gamma_{\Sigma} = \frac{1}{2} \frac{\Gamma_{\Sigma}}{u D} \quad (2.6)$$

где D – эквивалентный диаметр среза сопла (лепесткового насадка), $d_i = \sqrt{D^2/n}$, если n – общее число лепестков.

Величины γ_{Σ} и γ_i совпадают, если сопловой насадок образован идентичными элементами.

Можно оценить значение циркуляции для исследованного лепесткового насадка и сопоставить с характерными значениями Γ_i , использованными при расчетах, когда было достигнуто согласование данных расчета и эксперимента по структуре течения в струе.

Угол наклона верхней границы лепестка $\alpha_1 \cong 5^\circ$, угол наклона нижней границы кармана $\alpha_2 \cong 20^\circ$, т.е. максимальное значение взаимного скоса потоков -25° , $\text{tg} 25^\circ \approx 0.46$. Таким образом, максимальное значение относительной поперечной скорости на срезе сопла

$$\Delta v_{\max} \cong 0.46u$$

Значение $\Gamma_i = 0.12 u_0 D$, использованное при расчетах [5], соответствует для конкретных значений размеров лепестков и эквивалентного диаметра насадка величине разницы скоростей в соотношении (2.4)

$$\Delta v \cong 0.4u$$

Отсюда следует, что при оценке циркуляции, характеризующей интенсивность вторичных токов в начальном сечении струи, можно принять в первом приближении, что характерная скорость в соотношении для циркуляции (2.5) имеет среднее значение между максимальной и минимальной величинами, определяемыми продольным контуром лепестков

$$\Delta v \cong 0.5 \Delta v_{\max}$$

или значение коэффициента k в соотношении (2.3)

$$k \cong 0.4-0.6$$

Из проведенных оценок можно заключить, что при интенсивности вторичных течений $\Gamma_i = 0.12 u D$ и при $D/d = \sqrt{8}$ (для исследованного восьмилепесткового сопла) получается

$$\gamma_i \cong 0.35$$

При этом наблюдается снижение акустомеханического КПД (см. фиг. 2) приблизительно в 3–4 раза. В результате, по данным измерений имеем

$$\gamma_i \cong 0.35, \quad \Delta\eta/\eta \approx 2.5 \quad (2.7)$$

Здесь и в дальнейшем $\Delta\eta = \eta_0 - \eta$.

3. В [7–11] исследовалось воздействие на шум струи неровностей контура выходного сечения сопла, выполненных в виде треугольников, трапеций и т.п., называемых шевронами. Эти неровности могут продолжать продольную образующую контура сопла, могут быть загнуты либо внутрь сопла, либо отогнуты наружу.

Интерес к подобным устройствам объясняется их простотой и наличием заметного эффекта снижения шума струи. Эффект этот не велик: 1–2 дБ (иногда несколько больше или меньше) и наблюдается при практически незаметном снижении удельной тяги сопла. Есть даже данные о некотором улучшении характеристик сопла при установке шевронов.

Воздействие шевронов на дискретную составляющую шума, появляющуюся при сверхзвуковых перепадах давления на сопле, известно и здесь не рассматривается.

Но до настоящего времени нет устоявшихся представлений о механизме воздействия шевронов на основной шум турбулентной струи.

Однако если анализировать воздействие шевронов на шум струи с тех же позиций, что и для лепестковых сопел, то можно сделать определенные выводы о механизме воздействия шевронов на турбулентное течение в струе и излучаемый ею шум.

Несмотря на то, что в литературе описано большое количество экспериментов с шевронными соплами, известные данные не дают достаточно полной информации для каждой конкретной реализации геометрии шевронов, сопла, режимов истечения струи, спектров и других данных, необходимых для анализа. В связи с этим анализируются данные собственных экспериментов, изложенные в [11]. Эти данные находятся в полном соответствии с известными литературными данными по тем параметрам, по которым они могут сопоставляться.

На фиг. 1,б представлена схема исследованного сопла и шевронов. Шевроны выполнены в виде треугольников различной высоты (длины), которые загибались как внутрь сопла, так и отгибались наружу. Также исследованы случаи неоднородного загиба шевронов: с одной стороны сопла шевроны загибались внутрь сопла, с другой – или не загибались, или отгибались наружу.

Далее дается анализ только данных, полученных при использовании сопел с шевронами, параллельными образующим конического сопла и загнутыми внутрь.

Исследовалось воздействие шевронов, данные для которых представлены в табл. 1.

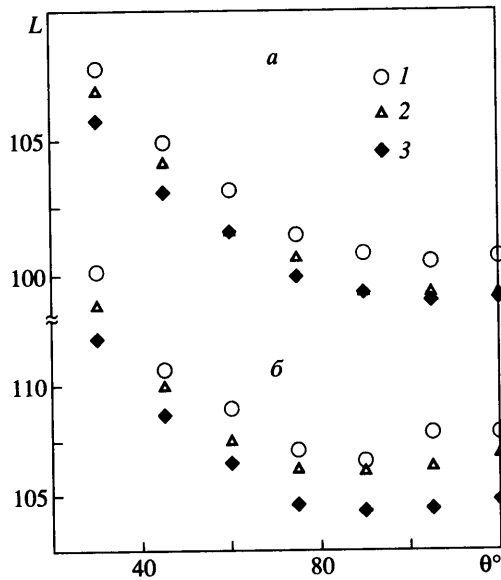
Результаты измерений физических спектров звукового давления для $\theta = 30$ и 60° и $P_n = 2.4$ при использовании различных шевронов показывают, что шевроны убирают дискретную составляющую и в первую очередь воздействуют на низко- и среднечастотную составляющие спектра.

На фиг. 3 приведены результаты измерений диаграмм направленности, полученные для режимов с $P_n = 1.7$ (а) и 2.2 (б) при использовании различных шевронов. Вид диаграммы направленности изменяется слабо при заметном эффекте воздействия шевронов.

По данным измерений диаграмм направленности определены значения акустической мощности и акустомеханического КПД при изменении скорости истечения за счет

Таблица 1

№	α	L , мм	ΔL_f , дБ
1	6°	10	1.2
2	6°	20	2
3	22°	20	3
4	39°	20	4



Фиг. 3. Зависимость уровней звукового давления L (дБ) от угла наблюдения θ° :
1 – эталонное сопло, 2, 3 – шевроны $L = 10$

изменения перепада давления на сопле P_n . Эти данные показывают, что при умеренных значениях перепада давления эффект воздействия шевронов слабо зависит от P_n .

Когда шевроны продолжали конический контур сопла и их угол установки α составлял приблизительно 6° , воздействие шевронов было относительно слабым.

Усиливалось воздействие шевронов загибанием их внутрь сопла. Результаты измерений акустических спектров для этих конфигураций приведены на фиг. 4.

При увеличении размеров шевронов и их проникновения в поток уменьшается уровень звукового давления на низких и средних (вблизи максимума) частотах. При значительном проникновении шевронов в поток появляется дополнительный шум в средней и высокочастотной областях. Это, по оценкам, соответствует проявлению шума обтекания шеврона с соответствующим значением характерного числа Струхала в акустическом спектре [15].

В результате суммарный эффект воздействия шевронов на шум струи снижается. Вследствие появления дополнительного шума обтекания шевронов при их установке на углы $\alpha = 22$ и 39° акустомеханический КПД практически не уменьшается.

Однако, если отбросить в спектрах превышение шума по сравнению с эталоном в высокочастотной части, можно рассмотреть снижение шума ΔL_f в той области спектра, где воздействие шевронов проявляется при всех углах установки.

Для $P_n = 1.7$ это воздействие, по данным фиг. 3 и 4, можно свести в табл. 1.

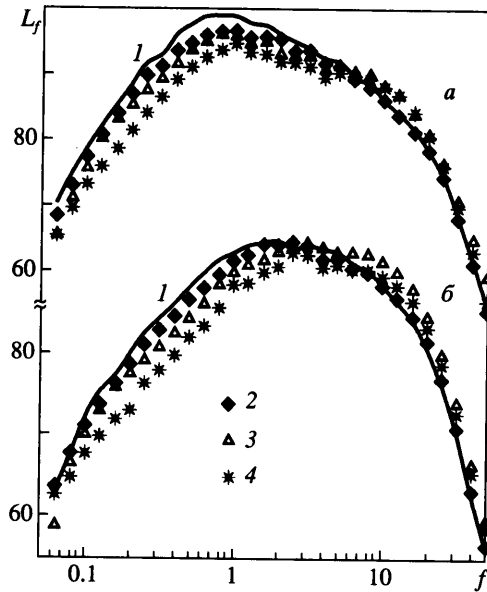
4. Данные по воздействию шевронов на шум струи можно сопоставить с данными по воздействию лепестковых насадок, изложенными в предыдущем разделе.

При обтекании шевронов, так же как и при обтекании лепестков, создаются условия для появления взаимного скоса потоков: 1) обтекающего лепесток (шеврон) – поток направлен вдоль поверхности, 2) движущегося между лепестками (шевронами) – поток идет вдоль оси или немного наружу из-за вытесняющего действия шеврона. В первом приближении разница скоростей, образующая вихрь будет

$$\Delta v \approx utg\alpha \approx u\alpha$$

(4.1)

Здесь α – угол наклона шеврона к оси струи.



Фиг. 4. Влияние воздействия шевронов на акустические спектры шума струй при $P_n = 1.7, L = 20$ мм: *a* – $\theta = 30^\circ$, *b* – 60° ; 1 – эталонная струя, 2 – $\alpha = 6^\circ$, 3 – 22° , 4 – 39°

По аналогии с соотношением (2.5) для величины циркуляции в образующемся вихре Γ_i можно записать соотношение

$$\Gamma_i = \Delta v L \approx u \alpha L_k$$

где L_k – длина кромки шеврона. Для шеврона длиной 10 мм – $L_k = 17.1$ мм, при длине 20 мм – $L_k = 24.4$ мм.

На фиг. 5, *a, б* показана схема вихревого течения, возникающего на кромке шеврона.

Из-за проникновения шеврона в поток часть потока устремляется наружу и, взаимодействуя с течением вдоль наружной поверхности шеврона, создает вихрь. Визуализации течений, возникающих при воздействии шевронов на поток, показали примеры их структур, свидетельствующие о наличии такого механизма вихреобразования [16].

По аналогии с анализом из разделов 2 можно определить относительную интенсивность вторичного течения, создаваемого шевроном, как

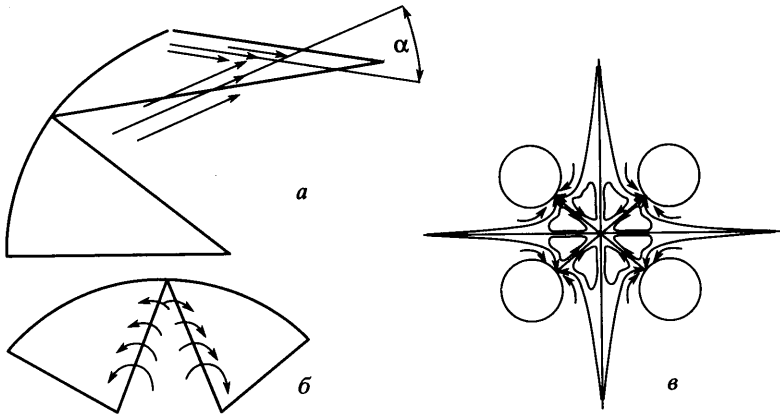
$$\gamma_i = \Gamma_i (u d_i)^{-1}$$

где $d_i = D / \sqrt{n}$, где n – число шевронов.

Данные табл. 1 можно условно перевести в значение акустомеханического КПД и его относительное изменение $\Delta \eta / \eta$. Для исследованных конфигураций значения γ_i и $\Delta \eta / \eta$ представлены в табл. 2.

Таблица демонстрирует увеличение параметра $\Delta \eta / \eta$ с ростом продольной завихренности, создаваемой шевронами. При этом следует иметь в виду условность величин обоих параметров в последних двух строках таблицы.

В двух последних случаях значения $\Delta \eta$ получены путем косвенной оценки. Кроме того, величины γ_i для этих случаев могут быть завышены. При таких больших углах загиба шевронов ($\alpha > 20^\circ$), по-видимому, нарушается условие (4.1), использованное



Фиг. 5. Схемы возникающих вторичных течений: *a, б* – при обтекании шевронов, *в* – при подтекании к струям, распространяющимся из насадка с четырьмя трубками

при оценке величины γ_i . В связи с этим в скобках приведены уменьшенные соответственно значения γ_i в 1.5 и 2 раза.

5. Результаты исследования шума струй, распространяющихся из нескольких трубок, изложены в [4, 12], схема моделей показана на фиг. 1,а.

Эффекты изменения акустических характеристик при взаимодействии струй, обусловленных расположением струй в соответствии со схемами фиг. 1,в, незначительны. Однако при измерениях акустических характеристик были четко зафиксированы изменения акустических спектров и суммарной мощности излучения при вариации расположения струй. Измеренные значения акустомеханического КПД при $P_n = 1.7$ обнаружили их разницу для разных компоновок, относительная величина которой приведена в табл. 3.

Здесь l – расстояние между центрами трубок, d – их индивидуальный диаметр.

Для рассмотренной конфигурации эффект снижения акустомеханического КПД также может быть связан с возникновением продольной завихренности.

Действительно, в случае свободной струи втекание в струю из окружающего пространства происходит по нормали к круговому контуру поперечного сечения струи. При наличии нескольких струй линии тока втекания искривляются и при взаимодействии с течением в струе могут создавать вихрь, аналогичный тем, которые рассмотрены при анализе обтекания лепестков и шевронов. Однако источником вихря может служить только кромка, на которой этот вихрь может образоваться. Такими кромками являются кромки выходных сечений трубок. Схема рассматриваемого течения представлена на фиг. 5,в.

На фиг. 5,в показано вторичное течение, которое накладывается на основное движение втекающего газа (жидкости). Оценить значения параметров Δv и L , определяющих величину циркуляции Γ , как это было сделано в предыдущих разделах, здесь затруднительно. Можно только приблизительно оценить величину Γ и ее изменение при переходе от варианта расположения трубок с $l/d = 3.1$ к 1.9.

Согласно конструктивным данным, расстояние между трубками при таком переходе меняется в 3.7 раза, т.е. площадь проходного сечения изменяется в 3.7 раза. На эту величину должна возрасти скорость поперечного втекания. Однако при этом уменьшается область вихревого взаимодействия, изображенная на фиг. 5,в. Можно предположить, что ее характерный размер меняется в 2 раза, т.е. в соотношении для цирку-

Таблица 2

γ_i	$\Delta\eta/\eta$
0.057	0.25
0.0815	0.55
0.3 (0.2)	1
0.5 (0.25)	1.5

Таблица 3

l/d	$\Delta\eta/\eta$
∞	0
3.1	0.12
1.9	0.23

Таблица 4

γ_i	$\Delta\eta/\eta$
0.035	0.12
0.07	0.23

ляции Γ_i параметр Δv возрастает в 3.7 раза, а характерная длина уменьшается в 2 раза, т.е. $\Gamma_{i1}/\Gamma_{i2} \approx 1.85$.

Здесь Γ_{i1} соответствует значению $1/d = 1.9$, Γ_{i2} – значению $1/d = 3.1$.

Грубо оценить величину относительной продольной завихренности γ_i можно исходя из следующих соображений.

Согласно [17], скорость втекания в струю

$$V_b \approx 0.05u$$

Из-за поджатия потока скорость поперечного движения вблизи кромки трубки может составить

$$w \approx 2V_b$$

В соответствии с представленной на фиг. 5,в картиной течения

$$\Delta v \approx w, \quad L \approx d/2$$

Из соотношений (2.5) и (2.6) следуем

$$\gamma_i \approx 0.05$$

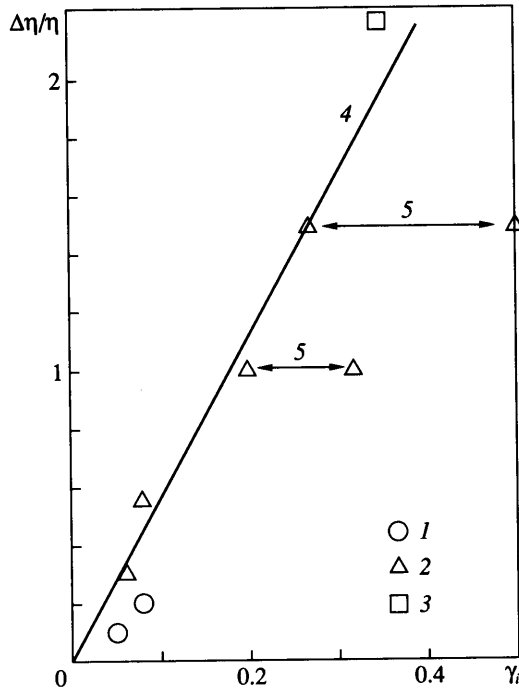
Примем, что это среднее значение для двух рассмотренных конфигураций.

Тогда данные измерений изменения акустомеханического КПД для трубок можно представить в виде табл. 4.

6. В предыдущих разделах изложены результаты исследования трех типов воздействия на течение в струе: лепестковое сопло, шевронное сопло, многотрубчатое сопло.

По итогам изложенного анализа можно заключить, что:

а) при использовании лепестковых сопел воздействие на акустомеханический КПД наблюдается при возникновении циркуляционного течения с осевой компонентной за-



Фиг. 6. Итоговая зависимость изменения акустомеханического КПД от значения безразмерной продольной завихренности γ_i по данным опытов для разных моделей сопел: 1 – четыре трубки, 2 – шевроны, 3 – лепестковые сопла, 4 – интерполяция экспериментальных данных, 5 – интервал оценки значения γ_i

вихренности, при этом также трансформируется спектр акустического излучения. На основании имеющихся данных можно предположить, что при отсутствии такой завихренности (если, например, продольный контур сопла имеет цилиндрические образующие) главным образом трансформируется спектр акустического излучения, без существенного изменения акустомеханического КПД; б) при использовании шевронных сопел воздействие на акустомеханический КПД и акустический спектр связано главным образом с возникновением продольной завихренности; в) с появлением продольной завихренности при распространении струй из нескольких близкорасположенных трубок можно связать наблюдающееся снижение акустомеханического КПД.

Таким образом, возникновение продольной завихренности на срезе соплового устройства, из которого распространяется струя, приводит к снижению акустомеханического КПД. Воспользовавшись значениями $\Delta\eta/\eta$ для исследованных случаев течения из предыдущих разделов можно показать, что эффект снижения шума струи возрастает с ростом продольной завихренности γ_i . Это иллюстрируют данные фиг. 6, где представлены результаты сопоставления относительного изменения величины $\Delta\eta/\eta$ со значениями параметра завихренности γ_i для исследованных конфигураций сопловых устройств. Данные взяты из соотношения (2.7) и табл. 2 и 3.

Можно видеть, что имеет место монотонная зависимость: с увеличением продольной завихренности растет эффект снижения шума (акустомеханического КПД) турбулентных струй.

Относительно механизма воздействия продольной завихренности на шум струи можно сделать следующие предположения.

По результатам прямого и косвенного наблюдения течения в струях за лепестковыми соплами можно заключить, что при наличии продольной завихренности уменьшается поток энергии турбулентности и происходит более интенсивное смешение.

Снижение акустического излучения может быть обусловлено любым из указанных эффектов, а тем более их совокупностью (если связывать энергию акустического излучения с энергией турбулентности и размерами излучающего объема).

Эти данные и результаты исследования шевронных сопел и многотрубчатой компоновки показывают, что, по-видимому, существует механизм воздействия продольной завихренности на турбулентность, когда энергия турбулентных пульсаций снижается из-за воздействия завихренности.

Это соответствует модели взаимодействия турбулентных вихрей различных масштабов, описанной А. Таунсендом [18].

7. Рассматриваются процессы порождения и передачи энергии турбулентности в сдвиговом слое, который будем отождествлять со слоем смешения в турбулентной струе. Исходной посылкой является предположение, что турбулентное движение жидкости осуществляется двояким образом: внутри области турбулентной жидкости и движением этой области – перемежаемостью турбулентности [18].

Согласно анализу [18], энергетический баланс турбулентности в сдвиговом слое (который отождествляем со слоем смешения) может быть представлен в виде

$$\frac{d}{dt} \int \frac{1}{2} (u'_i)^2 dV + \int u'_i \frac{\partial}{\partial x} [(u'_i + u''_i)(u'_i + u''_i) - \overline{u_i u_i}] dV + \int u'_i u'_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} dV = 0 \quad (7.1)$$

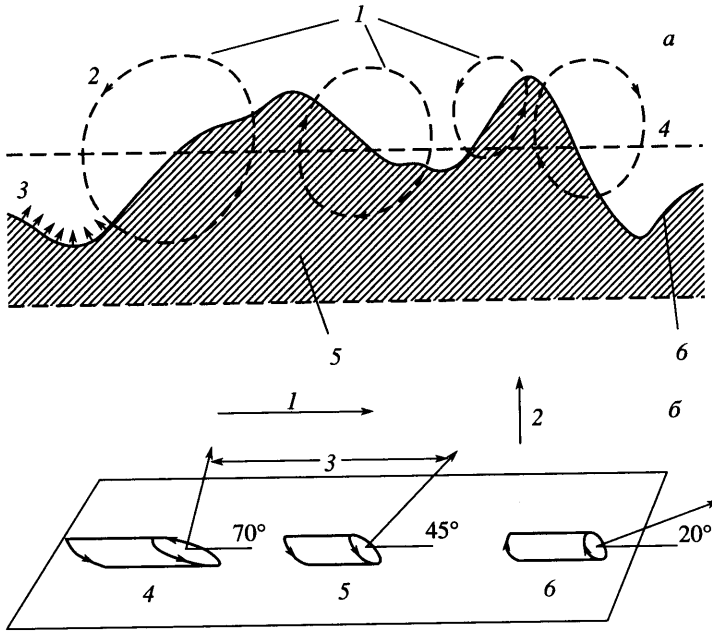
Это соотношение следует из уравнений движения при некоторых предположениях относительно свойств больших и малых вихрей и при пренебрежении непосредственным действием вязкости.

Здесь u_i – пульсационные составляющие скорости, u'_i , u''_i – медленно и быстро меняющиеся части u_i , U_i – составляющие средней скорости, V – объем интегрирования.

Первый член соотношения (7.1) характеризует изменение энергии больших вихрей. Два других члена описывают процессы, обеспечивающие поступление и отток энергии к большим вихрям и от них. Последний член – приток энергии к большим вихрям от основного потока за счет наличия сдвига (поперечных градиентов средней скорости для рассматриваемого течения), второй член описывает передачу энергии пульсаций от больших вихрей к “вполне турбулентной жидкости”.

Проведенный в [18] анализ показывает, что движение жидкости в сдвиговом слое сопровождается вращательным движением вихрей, вихри вытянуты вдоль потока и захватывают жидкость окружающей среды за счет вращательного движения относительно продольной оси. Схема течения в сдвиговом слое в этой интерпретации представлена на фиг. 7,а, где приведено поперечное сечение плоского слоя смешения, а его продольная ось направлена перпендикулярно плоскости фигуры.

На фиг. 7,б дана схема трансформации вихрей, полученная в [18] на основании соотношения (7.1). Первоначально, в момент образования, большой вихрь имеет завихренность, направленную практически перпендикулярно по отношению к направлению среднего движения. Осредненный поток за счет градиента средней скорости (на фиг. 7 положительного) поворачивает ось вращения в сторону оси потока и тем самым совершает работу и передает энергию большим вихрям. Большой вихрь отдает энергию вполне турбулентной жидкости благодаря наличию вращательной компоненты с направлением вектора завихренности вдоль продольной координаты (основного направления течения, см. фиг. 7,а). Баланс поступления энергии к большому ви-



Фиг. 7. Интерпретация взаимодействия больших вихрей с турбулентной жидкостью по [18]: а – поперечное сечение слоя смешения: 1 – движение больших вихрей, 2 – нетурбулентная жидкость, 3 – первичный захват нетурбулентной жидкости, 4 – предел изменения средней скорости, 5 – однородная турбулентная жидкость, 6 – граница между турбулентной и нетурбулентной жидкостями; б – динамика вектора завихренности: 1 – средняя скорость, 2 – направление градиента скорости, 3 – нормали к плоскости циркуляции, 4 – возникновение и разрастание, 5 – равновесие, 6 – вырождение

хрю и передачи ее вполне турбулентной жидкости устанавливается при наклоне нормали к плоскости вращения вихря где-то посредине между 90° и 0 .

Исходя из условия равновесия в соотношении (7.1)

$$\frac{d}{dt} \int \frac{1}{2} (u_i)^2 dV = 0$$

Таунсенд определил константу турбулентности (число Рейнольдса турбулентности) для сдвигового слоя. Это условие соответствует углу наклона вектора вихря около 45° .

Отсюда следует, что чем больше продольная компонента завихренности, тем меньше получают энергии большие вихри от основного потока, сильнее сдвигается баланс равновесия потоков энергии в сторону меньшего энергетического обмена между большими вихрями и вполне турбулентной жидкостью.

Это обозначает, что наличие продольной завихренности может вызывать детурбулизацию в некоторой области течения, а значит и снижение общего потока энергии турбулентности в этой области, и падение мощности акустического излучения (следует заметить, что уменьшение интенсивности турбулентного обмена наблюдалось при исследованиях закрученных течений и в вихревых следах [17, 19]).

Этот вывод подтверждается и результатами измерений акустических спектров при исследованиях шевронных сопел.

На фиг. 4 показаны акустические спектры и их изменение при воздействии шевронов. Это воздействие можно интерпретировать как снижение энергии больших вихрей (падение уровня звукового давления в низкочастотной части спектра).

В соответствии с изложенными данными, этот эффект обусловлен рождением продольной завихренности γ_i на кромках шевронов.

8. На фиг. 6 показано, что наблюдается монотонный рост воздействия на акустомеханический КПД, его монотонное снижение с увеличением параметра γ_i не только при использовании шевронных сопел, но и при других воздействиях (лепестки, многотрубчатый насадок).

Это показывает, что концепция разработки схем лепестковых шумоглушащих сопел в связи с установлением эффекта воздействия на шум струи продольной компоненты завихренности, должна быть уточнена. Действительно, ранние исследования [1–4] связывали воздействие на шум струи исключительно с трансформацией поля течения в струе: чем сильнее воздействие на поле течения в струе, тем больше эффект снижения шума струи. Однако из изложенного анализа следует, что необходимы исследования акустических эффектов при использовании схем выходных устройств, которые создавали бы максимальные значения продольной завихренности, описываемой введенным выше параметром γ_i . Возможно, при этом удастся увеличить значение эффективности шумоглушения по сравнению с указанным ранее предельным достигнутым значением 3 дБ на 1% потерь тяги.

Поскольку воздействие является гидродинамическим, оно связано с возмущением потока и появлением дополнительных потерь в тяге сопла. И лепестки, и шевроны воздействуют на поток, поэтому условием выбора их наилучшей конструкции может быть минимизация потерь при создании возможно большей продольной завихренности.

Развитая модель воздействия шевронов на течение в струе позволяет анализировать возможность перенесения результатов модельных исследований на другие объекты: главным условием является моделирование взаимодействия потока с шевронами.

Однако, по-видимому, снижение эффективности воздействия шевронов может наблюдаться в тех случаях, когда структура потока, окружающего шевроны, такова, что продольная завихренность не возникает или очень мала. Это может иметь место при обтекании шевронов сильно неоднородным потоком, а также потоком с большим исходным уровнем возмущений.

Именно такой случай реализовался при исследовании воздействия шевронов на шум струи при моделировании проточного тракта двигателя со смещением [11]. Из-за большого загромождения потоков моделью смесителя и подводящих каналов двух контуров поток, взаимодействующий с шевронами, был сильно неоднороден и (по оценкам) имел высокий уровень турбулентных пульсаций.

Следует заметить, что модель взаимодействия вихрей на основе схемы течения в слое сдвига, развитой в [18], может не реализовываться в тех случаях, когда течение в слое смещения искажается внешними возмущениями. В этих случаях шевроны могут также не создавать эффекта акустического воздействия.

Безусловный интерес представляло бы экспериментальное исследование воздействия продольной завихренности на турбулентность и турбулентное смешение. Хотя можно считать, что изложенные материалы в какой-то степени подтверждают модель А. Таунсенда, описывающую взаимодействие вихрей в турбулентном слое смешения, эффект детурбулизации при наличии продольной завихренности нуждается в исследовании. Имеющаяся информация о снижении интенсивности смешения в вихревых следах за летательным аппаратом, при закрутке потока [17, 19] и т.п. показывает, что такие эффекты имеют место.

Наличие продольной завихренности, обусловленной конфигурацией сопла, по-видимому, объясняет ряд известных экспериментов по исследованию шума струй:

– Некоторое снижение шума при истечении струи из плоского сопла (где в угловых зонах могут образовываться вихри), причем это снижение (0.5–1.5 дБ) различно в экспериментах [20, 21].

– Аналогичное описанному в разделе 5, снижение шума при истечении струй из нескольких цилиндрических насадков, расположенных в ряд, когда взаимное экранирование отсутствует [22].

Влияние завихренности, создаваемой различными элементами, на характеристики турбулентных течений является предметом ряда исследований.

Исследования вихревого следа за кромками крыльев летательных аппаратов [19] показывают, что имеет место его заметное воздействие на процессы турбулентного смешения. Для описания этого эффекта необходима разработка соответствующих моделей турбулентности [23], при этом для анализа воздействия завихренности используется параметр Γ , аналогичный введенному выше (см. соотношение (2.2)).

Одним из примеров экспериментального исследования воздействия искусственно создаваемой завихренности на течение в струе и ее шум является [24]. Однако в этих исследованиях не содержится количественной оценки создаваемой завихренности.

Заключение. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований различных воздействий на шум турбулентных струй.

Эффект воздействия на шум струи определялся экспериментально по изменению акустомеханического КПД струй при наличии воздействия, по сравнению с КПД осесимметричных струй.

Анализ экспериментальных данных показал, что воздействия лепестковых сопел, многотрубчатых насадков и шевронных сопел оказываются аналогичными и обусловлены, в частности, возникновением продольной компоненты завихренности на выходе из соплового устройства. Показано, что данные по снижению акустомеханического КПД исследованных турбулентных струй для всех указанных воздействий (лепестковые сопла, многотрубчатые насадки и шевронные сопла) описываются параметром γ_i , характеризующим относительную интенсивность продольной завихренности, создаваемой каждым воздействующим элементом: лепестком, трубкой, шевроном.

Продольная завихренность создает условия для более интенсивного смешения, что приводит в случае использования лепестковых смесителей к сокращению излучающего объема струи и одновременно (в соответствии с моделью А. Таунсенда) во всех исследованных случаях приводит к снижению энергии турбулентных пульсаций.

Эффективность воздействия на акустомеханический КПД монотонно возрастает с ростом параметра завихренности.

Оценочные значения γ_i могут быть определены на основании изложенного анализа. Для более точного определения завихренности необходимы расчеты трехмерного вязкого течения в сопловом устройстве с идентификацией свойств течения: наличие пограничного слоя, уровень возмущений и неоднородности потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы поддержки ведущих научных школ (НШ-2124.2003.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
2. Крашенинников С.Ю., Соркин Л.И., Толстошеев М.Н., Яковлевский О.В. Исследование акустических и газодинамических характеристик струйного шумоглушителя // Акуст. журн., 1970. Т. 16. Вып. 1. С. 88–95.
3. Krashennnikov S.Yu., Mironov A.K., Paulukov E.V., Zitenov V.K., Julliard J., Maingre E. An experimental study of 2-D mixer/ejector noise and thrust characteristics // AIAA Paper. 1996. № 96–166. 11 p.
4. Krashennnikov S.Yu., Mironov A.K. Aerodynamic and acoustic characteristics of turbulent jets flows in mixer-ejector exhaust systems // Proc. 5th Intern. Symp. on Transport Noise and Vibration. St. Peterburg, Russia, Publ. EEAA, 2000. 7 p.

5. *Krasheninnikov S.Yu., Mironov A.K., Vasiliev V.I., Zakotenko S.N.* An analysis of efficiency of mixer/ejector for aircraft jet noise suppression // Proc. Intern. EAA/EEAA Symp. Transport Noise and Vibration. Tallin: Tech. Univ., 1998. P. 353–356.
6. *Krasheninnikov S.Yu., Mironov A.K., Pavlyukov E.V., Zitenev V.K., Shenkin A.V.* An influence of SST-2 mixer-ejector nozzle elements variations on its aerodynamic and acoustic characteristics // Proc. 5th Intern. Congr. Sound and Vibration. Adelaide, Australia, 1997. P. 659–668.
7. *Saiyed Naseem H., Mikkelsen Kevin L., Bridges James E.* Acoustics and thrust of separate-flow exhaust nozzles with mixing devices for high-bypass-ratio engines // IAA Paper. 2000. № 1961. 18 p.
8. *Zaman K.B.M.Q., Reeder M.F., Samimy M.* Supersonic jet mixing enhancement by “delta-tabs” // AIAA Paper. 1992. № 92-3548. 14 p.
9. *Panda J., Zaman K.B.M.Q.* Density fluctuation in asymmetric nozzle plumes and correlation with far field noise // AIAA Paper. 2001. № 0378. 12 p.
10. *Saiyed N.H., Bridges J.E.* Tabs and mixers for reducing low bypass ratio jet noise // AIAA Paper. 1999. № 99–1986. 12 p.
11. *Krasheninnikov S.Yu., Mironov A.K., Pavlyukov E.V., Jitenev V.K.* An investigation of possibility of turbo engine exhaust jet noise reduction using chevron nozzles // Proc. 6th Intrn. Symp. Transport Noise and Vibration. St. Peterburg, Russia, Published by EEAA. 2002. 7 p.
12. *Крашенинников С.Ю., Миронов А.К.* Моделирование процессов смешения и излучения шума в струях за лепестковыми соплами // Тез. докл. на семинаре “Авиационная акустика” (2000). М.: ЦАГИ, 2000. С. 18–20.
13. *Довжик С.В., Крашенинников С.Ю., Миронов А.К.* Метод локальных источников для расчета шума турбулентной дозвуковой струи // Газовая динамика. Избранное / Под ред. А.Н. Крайко и др. М.: Физматлит, 2001. Т. 2. С. 329–331.
14. *Васильев В.И., Крашенинников С.Ю., Руди Ю.А.* Расчет распространения трехмерной турбулентной струи из лепесткового сопла в спутном потоке // Изв. вузов. Авиационная техника. 1984. № 1. С. 18–22.
15. *Strouhal V.* Uber eine besondere Art der Tonnerregung // Ann. Phys. 1878. Bd. 5. S. 216–251.
16. *Bridges J., Envia E., Huff D.* Recent developments in U.S. engine noise reduction research // Proc. 15th Intrn. Symp. on Air Breathing Engines. Bangalor, India, Published by Indian National Organising Committee. 2001. № 1017. 9 p.
17. *Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П.* Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
18. *Townsend A.A.* The Structure of Turbulent Shear Flow. Cambridge: Univ. Press, 1956. Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 400 с.
19. *De Bruin A.C., Hegen S.H., Rohne P.B., Spalart P.R.* Flow field survey in trailing vortex system behind a civil aircraft model at high lift // AGARD Conf. Proc. 1996. V. 584. P. 25–1–25–11.
20. *Kerechanin C.W., Samimy M., Kim J.-H.* Effect of nozzle trailing edge modifications on noise radiation in supersonic rectangular jet // AIAA Paper. 2000. № 0086. 10 p.
21. *Кузнецов В.М.* Звуковое поле струи, истекающей из щелевидного сопла // Тр. ЦАГИ. 1979. № 2000. С. 15–24.
22. *Пимштейн В.Г., Андреев А.А.* О шуме параллельных околосзвуковых струй // Тр. ЦАГИ. 1971. № 1371. С. 18–21.
23. *Спаларт Ф.Р., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л.* Моделирование турбулентного вихревого следа за механизированным крылом // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 5. С. 64–72.
24. *Ibrahim M.K., Nakamura Y.* Flow field and noise characteristics due to supersonic jet shear layer-vortex interaction // AIAA Paper. 2000. № 2533. 11 p.