

зы, которое в изотермическом случае имеет вид  $\alpha P = \alpha_0 P_0$ , где индексом 0 отмечены значения при  $t=0$ .

Введем обозначение:  $M = \rho_m \cup$ . Переход к безразмерным координатам осуществляется так же, как и в общей задаче, с добавлением:  $\bar{c}_m = \frac{c_m}{c_0}$ . Дальнейший ход решения задачи аналогичен предыдущему.

Пакет прикладных программ, разработанный на основе предложенной математической модели, позволяет рассчитывать значения основных параметров рабочей среды по длине гидросистемы в конкретный момент времени или в определенной точке тракта в течение заданного времени, а также исследовать поведение этих параметров при возникновении кавитационных явлений.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ИСКУССТВЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЗВУКОВОЙ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ

Загузов И.С., Калабухов В.Н.

Самарский государственный университет, г. Самара

Существенным недостатком методов расчета шума реактивной струи является неточное определение влияния поверхности с искусственным покрытием (поверхности земли) на уровни шума реактивной струи. Следует также учитывать, что встречающиеся на практике источники и приемники звука практически всегда имеют вполне определенные характеристики направленности, что может изменить характер звукового поля вблизи поверхности с искусственным покрытием. Исследования последних лет [1] показали, что эмпирические зависимости, используемые в расчетных методах, нуждаются в корректировке.

Влияние поверхности с искусственным покрытием на шум турбулентного газового потока может проявляться различными способами. Во-первых, шум реактивной струи отражается и дифрагирует у поверхности земли как на акустической границе, во-вторых, за счет вязкости газа вблизи поверхности земли образуется пограничный слой, являющийся источником дополнительного шума.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [2] шум, излучаемый пограничным слоем дозвукового газового потока вблизи больших плоских поверхностей, мал. Таким образом, в случае дозвуковой реактивной струи поверхность с искусственным покрытием только отражает падающую звуковую волну, генерируемую расположенными вблизи поверхности объемными дипольными и квадрупольными источниками. Такое отражение звука может существенно изменить характеристику направленности излучаемого звука и привести к образованию избыточного ослабления или усиления шума реактивной струи вблизи поверхности земли.

Для учета явления отражения и дифракции использовался подход, основанный на аэроакустической теории Лайтхилла и методе функции Грина. Считаем, что реактивная струя не касается поверхности с искусственным покрытием и шумом пограничного слоя можно пренебречь. Также не учитываем влияние поверхности на структуру турбулентности аэродинамического потока.

Исходя из сделанных предположений, в соответствии с работой [1], для звукового поля реактивной струи вблизи поверхности земли можно записать :

$$P(\bar{x}, \omega) = P_1 + P_2, \quad (1)$$

где

$$P_1 = -\frac{ik}{4\pi} \int_V F_j \Phi_i^{(1)}(r_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1} dV - \frac{ik}{4\pi} \int_V F_j Q_i^{(1)} \frac{e^{ikr_2}}{r_2} dV$$

звуковое поле "сдвигового шума";

$$P_2 = -\frac{k^2}{4\pi} \int_V T_{ij} \Phi_{ij}^{(2)}(r_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1} dV - \frac{k^2}{4\pi} \int_V T_{ij} Q_{ij}^{(2)} \frac{e^{ikr_2}}{r_2} dV -$$

звуковое поле "собственного шума";

$\Phi_j^{(1)}$  - характеристика направленности дипольного источника;

$\Phi_{ij}^{(2)}$  - характеристика направленности квадрупольного источника;

$Q_i^{(1)}, Q_{ij}^{(2)}$  - обобщенные коэффициенты отражения;  $k = \frac{\omega}{c}$  - волновое

число в воздухе;  $r_1, r_2$  - пути прямой и отраженной звуковых волн;

$V$  - объем, занимаемый струей.

Умножая уравнение (1) на комплексно - сопряженную величину, для спектральной плотности звукового давления от реактивной струи вблизи поверхности с искусственным покрытием находим :

$$S(\bar{x}, \omega) = \frac{1}{r_1^2} \int \left| \Phi_{jl}^{(2)} \right| \left| \Phi_{nm}^{(2)} \right| H_{j \ln m}(\bar{\xi}, \bar{k}, \omega) \cos(\Delta_{jl}^{(2)} - \Delta_{nm}^{(2)}) d\bar{\xi} + \\ + \frac{2}{r_1 r_2} \int \left| \Phi_{jl}^{(2)} \right| \left| Q_{nm}^{(2)} \right| H_{j \ln m}(\bar{\xi}, \bar{k}, \omega) \cos(k \Delta r + \delta_{nm}^{(2)} - \Delta_{jl}^{(2)}) d\bar{\xi} + \\ + \frac{1}{r_2^2} \int \left| Q_{jl}^{(2)} \right| \left| Q_{nm}^{(2)} \right| H_{j \ln m}(\bar{\xi}, \bar{k}, \omega) \cos(\delta_{jl}^{(2)} - \delta_{nm}^{(2)}) d\bar{\xi} , \quad (2)$$

$$H_{j \ln m}(\bar{\xi}, \bar{k}, \omega) = \frac{k^4}{16\pi^2} \int T_{il} T_{nm}^* e^{-ik\bar{\eta}} \delta\bar{\eta} ; \quad (3)$$

где  $\Delta r = r_2 - r_1$ ;  $\bar{\xi} = \frac{1}{2}(\bar{y} + \bar{z})$ ;  $\bar{\eta} = (\bar{y} - \bar{z})$ ;  $T_{nm}^*$  - величина, сопряженная с  $T_{nm}$ ;  $\bar{y}, \bar{z}$  - координаты точек излучения объема  $V$ .

Из соотношений для спектральной плотности звукового давления от реактивной струи (2) и тензора спектральной плотности (3) следует, что спектральная плотность шума реактивной струи зависит от запаздывания, определяемого следующим выражением

$$\tau_1 = \frac{\Delta r}{c} + \frac{\delta_{nm}^{(2)} - \Delta_{jl}^{(2)}}{\omega} .$$

Если фазовая задержка  $\omega \cdot \tau_1$  приближается нечетными числами, кратными  $\pi$ , т.е.  $(2n-1)\pi$ , то имеет место интерференционное вычитание и в звуковом спектре появляются минимумы. При четных числах, кратных  $\pi$ , т.е.  $2n\pi$ , средний член в (2) положителен и в звуковом спектре появляются максимумы.

Таким образом интерференция звуковых волн вблизи поверхности земли приводит к образованию минимумов и максимумов в спектре шума реактивной струи.

Для уменьшения искажений, вызванных фазовым сдвигом используется методика проведения испытаний ГТД с одновременным измерением на двух высотах — 4,5 и 0,5 м. позволяющая при специальном формировании спектра шума из двух измерений исключить первые интерференционные минимумы, вносящие наибольшие искажения. В интервале частот от 50 до 630 Гц спектр шума состоит из уровней звукового давления, измеренных на высоте 0,5 м (частота первого интерференцион-

ного минимума находится в пределах 2500 — 4000 Гц), в интервале от 1600 до 10000 Гц — из уровней звукового давления, измеренных на высоте 4,5 м (частота первого интерференционного минимума находится в пределах 315 — 630 Гц.). Однако и в этом случае для нахождения уровней шума ГТД в свободном звуковом поле необходимо из измеренных уровней шума вычесть поправку на влияние поверхности стенда [3]

$$L_{ij} = \tilde{L}_{ij} - \Delta L_{ij}, \quad (4)$$

где  $\tilde{L}_{ij}$  — уровни шума, измеренные на  $j$ -м направлении и  $i$ -ой 1/3 — октавной полосе частот;  $\Delta L_{ij}$  — поправка на влияние поверхности стенда. Поскольку при анализе шума ГТД пользуются полосовыми фильтрами, то записывая отношение интенсивности излучения шума струи на выходе идеального полосового фильтра к интенсивности шума струи в свободном звуковом поле в децибелах, имеем:

$$\Delta L(\bar{x}) = 10 \lg \frac{I(\bar{x})}{I^*(\bar{x})}, \quad (6)$$

$$\text{где } I^*(\bar{x}) = \frac{1}{r_1^2} \int_{f_1}^{f_2} \int \left| \Phi_{jl}^{(2)} \right| \left| \Phi_{nm}^{(2)} \right| H_{i \ln m}(\bar{\xi}, \bar{k}, \omega) \cos(\Delta_{jl}^{(2)} - \Delta_{nm}^{(2)}) d\bar{\xi} df -$$

определяет интенсивность звукового давления от свободной реактивной струи на выходе полосового фильтра.

Соотношение (6) описывает влияние поверхности с искусственным покрытием на спектр шума реактивной струи.

Поскольку спектры шума ГТД формируются из спектров шума, измеренных на высотах 4,5 и 0,5 м, а реактивная струя является низкочастотным источником шума, для определения поправки на влияние поверхности стенда можно рекомендовать более простое соотношение [4]:

$$\Delta L_{ij} = 10 \lg \left\{ 3,5 + \frac{cR}{\pi f_i} \left[ 0,012 \tilde{I}_{bij} + 0,029 \tilde{I}_{cij} \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\tilde{I}_{bij} = \frac{I_{bij}}{I_{ij}}$ ;  $\tilde{I}_{cij} = \frac{I_{cij}}{I_{ij}}$ ;  $I_{ij} = I_{bij} + I_{cij}$ ;  $I_{cij}$  — интенсивность шума

струи в  $j$ -м направлении и  $i$ -й 1/3 октавной полосе частот;  $I_{bij}$  — интенсивность шума винта или вентилятора (компрессора) в  $j$ -м направлении и  $i$ -й 1/3 октавной полосе частот;  $c$  — скорость звука в атмосфере;  $R$



- расстояние от источника до микрофона ;  $f_i$  — центральная частота полосового фильтра .

Выражение (7) справедливо в диапазоне частот  $50 \leq f_i \leq 630$  для спектров шума, измеренных на высотах  $0 \leq h \leq 0,6$  , и учитывает когерентное сложение прямой и отраженной волн, усиление низкочастотного шума, обусловленное переносом энергии ближнего поля в дальнее нормальными волнами. Для  $h = 4,5$  м при  $f_i > 800$  Гц поправка на влияние поверхности с искусственным покрытием является практически постоянной величиной, равной 3 дБ. Поэтому при  $f_i > 800$  Гц можно положить  $\Delta L_{ij} \approx 3$  дБ. Для поправки на частоте 800 Гц необходимо взять среднеарифметическое значение величины, посчитанной по формуле (7) при  $f_i = 630$  Гц, и  $\Delta L_{ij} = 3$  дБ.

Учитывать влияние поверхности с искусственным покрытием на акустические характеристики реактивной струи необходимо и в случае определения эффективности средств шумоглушения реактивной струи, т.к. эффективность разрабатываемых мер шумоглушения струи определяется экспериментально путем испытаний на открытых акустических стендах.

Известно, что механизм генерации звука включает два типа взаимодействия: турбулентность-турбулентность, градиент средней скорости-турбулентность. Два типа взаимодействия обуславливают “собственный” и “сдвиговой” шум газового потока. Таким образом, снижение уровня шума реактивной струи возможно за счет уменьшения “сдвигового” и “собственного” шума.

Оценить влияния поверхности стенда на эффективность средств шумоглушения струи можно с помощью соотношения для спектральной плотности интенсивности шума струи

$$S(\bar{x}, \omega) = S_{cob} + S_{cd} ,$$

где  $S_{cob}$  ,  $S_{cd}$  - спектральные плотности “собственного” и “сдвигового” шума струи.

Однако, при расчете частотных характеристик реактивной струи необходимо знание тензоров спектральной плотности “сдвигового” и “собственного” шумов от элементарного объема. В общем случае, определение этих тензоров затруднительно. Поэтому оценка влияния поверхности стенда на эффективность средств шумоглушения струи была про-

ведена с использованием упрощающих предположений относительно структуры газового потока. В свободном звуковом поле отношение интенсивностей звука много меньше 1. Таким образом, при скорости истечения, меньшей скорости звука шум реактивной струи полностью определяется "сдвиговым" шумом.

Рассмотрим шум струи вблизи поверхности стенда с искусственным покрытием. Предполагая, что доминируют "квази-продольные" волны, соотношение для интенсивности шума струи запишем в виде

$$L_{ij} = 10 \lg \left( 1 + \frac{I_{ijcd}}{I_{ijcob}} \right).$$

Учитывая, что отношения интенсивностей пропорционально

$$\left( \frac{c}{c_1} \right)^2 \ll 1, \text{ где } c\text{-скорость звука в атмосфере, а } c_1\text{-скорость "квази-}$$

продольной" волны, можно утверждать, что в этом случае шум реактивной струи полностью определяется "собственным" шумом газового потока.

Итак, эффективность средств шумоглушения ГТД, определяемая на открытом стенде, может быть занижена или завышена (из-за переноса звуковой энергии ближнего поля в дальнее) по сравнению с эффективностью этих мероприятий в свободном пространстве.

Для приведения эффективности средств шумоглушения струи, определенной в условиях открытого акустического стенда, к эффективности в свободном звуковом пространстве, в расчетную модель по определению уровней шума реактивной струи вводятся поправки  $\Delta L_{ij}$ , учитывающие явления отражения и дифракции звуковых волн.

Использование данной модели при разработке методов испытаний и измерений шума ГТД на акустическом комплексе АО СНТК им. Н.Д. Кузнецова позволило повысить надежность и достоверность оценки акустических характеристик двигателей.

Например, было значительно сокращено время акустических испытаний двигателей НК-86 на открытом акустическом стенде, что дало реальный экономический эффект.

#### Список литературы

1. Генералов А.В., Загузов И.С., Калабухов В.Н. Приведение экспериментальных спектров шума реактивной струи к условиям свободного зву-

кового поля //Изв. вузов. Авиационная техника. 1990 г. № 2 .С . 76 – 79.

2. Мунин А.Г., Кузнецов В.Н., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. - М. : Машиностроение, 1981 г.
3. Генералов А.В., Загузов И.С., Калабухов В.Н., Нестеров В.Н.Способ определения уровня шума на открытом акустическом стенде .Авт . св .№ 1623389, 1990 г.
4. Загузов И. С., Калабухов В. Н. Особенности расчета акустических характеристик реактивной струи вблизи земной поверхности // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX межвуз. конф. / СамГТУ. Самара, 1999 . Ч. 1. С. 83-86.

## **ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА**

Кравцов А.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара

Проектирование и создание современных энергоустановок аэрокосмического назначения и их функциональных элементов невозможно успешно осуществить без знания акустических воздействий, которым они подвержены во время работы [1].

Современный уровень знаний не всегда позволяет оценить возможные нагрузки аналитически, в этих случаях единственный путь получения необходимых знаний об акустических нагрузках - эксперимент.

При проведении акустических экспериментальных исследований важным звеном подготовки измерительного тракта является градуировка приемников пульсаций давления с помощью устройств, создающих испытательный сигнал.

В настоящее время специальные градуировочные установки для приемников пульсаций давлений, выпускаемых промышленностью, не могут в полной мере удовлетворить потребности экспериментаторов. Поэтому вопросы создания средств градуировки датчиков быстропеременных давлений являются по-прежнему актуальными [1, 2].

Один из вариантов газоразрядной установки для тарирования датчиков описан в работе [3]. Данная конструкция, являясь источником тороидальной ударной волны, обеспечивает значительные скачки давления, температуры и плотности газовой среды в месте схлопывания. Однако данная конструкция имеет недостатки, к которым можно отнести: сложность многозазорной электродной системы, точечность источников удар-