

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ ДОЗВУКОВОЙ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Загузов И.С., Калабухов В.Н., Федечев А.Ф.
Самарский государственный университет, г. Самара

Развитие рынка турбореактивных двигателей (ТРД) гражданского применения связано с обеспечением качественно нового уровня показателей эксплуатационного и экологического совершенства двигателей нового поколения. Одним из факторов, которые определяют экологическое совершенство ТРД и, в конечном счете, его интеграцию в окружающую среду является уровень шума двигателя. Создание экологически совершенных двигателей связано с большими материальными затратами и продолжительными сроками разработки. Это обстоятельство требует более широко применять методы математического моделирования и проектирования.

Надежная идентификация основных источников шума газотурбинных двигателей и других силовых установок затруднена из-за искажения звукового поля вследствие взаимодействия шума двигателя с поверхностью стенда. Таким образом, при оценке уровня шума, производимого различными источниками, необходимо учитывать акустические свойства земной поверхности – фактора, который постоянно присутствует и оказывает существенное влияние на распространение звука.

Начиная с 70-х годов XX века, в связи с необходимостью, разработки надежных методов расчета шума самолетов на местности и средств его снижения, проводились систематические теоретические исследования закономерностей распространения шума с учетом влияния поверхности земли [1-2]. Рассматривалась следующая идеализированная модель: звуковое поле создается точечным монопольным источником над плоской земной поверхностью, акустические свойства которой описываются с помощью локально реагирующего импеданса. Точное решение задачи давалось в виде интеграла, допускавшего асимптотическую оценку. Однако, в этих работах предполагалось, что источник и приемник звука ненаправленные. Между тем встречающиеся на практике источники и приемники звука практически всегда имеют вполне определенные характеристики направленности. Действительно, согласно акустической аналогии Лайтхилла источники шума аэродинамического происхождения (воздушный винт, реактивная струя и т.д.) можно представить как совокупность дипольных и квадрупольных источников, распределенных по некоторой ограниченной области.

В задаче о звуковом поле дозвуковой реактивной струи вблизи земной поверхности, в качестве направленного источника, выбирался точечный мультиполь N -порядка, при этом приемник считался ненаправленным [3]. Полученные для этого случая результаты в силу теоремы взаимности

справедливы и для направленного приемника и ненаправленного источника звука.

Пусть в полупространстве D ограниченном локально реагирующей поверхностью S_1 расположен гармонический мультипольный источник N -порядка. Звуковое давление создаваемое мультиполем удовлетворяет уравнению

$$\nabla^2 P + k_1^2 P = - \frac{\partial^N}{\partial y_{i_1} \partial y_{i_2} \dots \partial y_{i_N}} \cdot \delta(\bar{x} - \bar{y}), \quad (1)$$

Так как излучение звука происходит вблизи локально реагирующей поверхности, необходимо выполнение граничного условия

$$P = - \frac{1}{i k_1 \beta} \frac{\partial P}{\partial n} \quad \text{на поверхности } S_1, \quad (2)$$

где β - удельный акустический адмитанс поверхности.

Кроме того, должно выполняться условие погашаемости

$$\lim_{|\bar{x}| \rightarrow \infty} P(\bar{x}, k_1) = 0. \quad \text{Im } k_1 > 0. \quad (3)$$

Вводя обозначения для пульсаций давления мультипольного источника N -порядка, решение уравнения (1) с граничными условиями (2), (3) представим в виде

$$P_{i_1, i_2, \dots, i_N}^{(N)} = \frac{\partial^N G}{\partial y_{i_1} \partial y_{i_2} \dots \partial y_{i_N}}. \quad (4)$$

Функция Грина полупространства ограниченного локально реагирующей поверхностью записывается в виде

$$G = G_0 + G_1, \quad G_0 = \frac{e^{i k_1 r_1}}{4 \pi r_1}, \quad (5)$$

$$G_1 = \frac{i k_1}{8 \pi} \int_{\gamma} H_0^{(1)}(k_1 r \sin \alpha) e^{i k_1 (x_2 + y_2) \cos \alpha} \Gamma(\alpha) \sin \alpha \, d\alpha, \quad (6)$$

где $\Gamma(\alpha) = \frac{\cos \alpha - \beta}{\cos \alpha + \beta}$ - коэффициент отражения плоских волн;

γ - контур интегрирования.

Таким образом, звуковые поля мультипольных источников вблизи локально реагирующей поверхности находятся последовательным дифференцированием поля монополя по соответствующим направлениям.

Таким же путем можно найти и асимптотику поля мультиполю. Однако при этом следует иметь в виду, что найденные таким образом асимптотики звуковых полей мультипольных источников могут быть недостаточно точными из-за неточности асимптотики поля монополя. Поэтому для асимптотической оценки в дальнейшем будем использовать точные интегральные представления звуковых полей мультипольных источников, которые находятся из соотношений (4) - (6). Перепишем (6) в виде

$$G_1 = \frac{ik_1}{8\pi} \int_{\gamma} F_{00}(\alpha) e^{ik_1 r_2 \cos(\alpha - \theta)} d\alpha,$$

$$F_{00}(\alpha) = \Gamma(\alpha) \sin \alpha H_0^{(1)}(k_1 r \sin \alpha) e^{-k_1 r \sin \alpha}, \quad (7)$$

где θ - угол падения звуковой волны.

Рассмотрим новый контур интегрирования γ' , который определяется уравнением $\cos(U - \theta) \operatorname{sh} V = 1$, $\alpha = U + iV$ и является КНС. Перейдем в интеграле от контура γ к γ' . При деформации контура γ в γ' могут пересекаться особые точки подинтегрального выражения (7). Особой точкой $\Gamma(\alpha)$ является полюс, который определяется из уравнения $\cos \alpha_p = -\beta$, $\alpha_p = U_p + iV_p$. Полюс пересекается при деформации контура γ в γ' , если $\theta \gg \theta_p$, $\theta_p = U_p - \arccos(\operatorname{sch} V_p)$. Поэтому контурный интеграл в (7) можно представить:

$$G_1 = \frac{ik_1}{8\pi} \int_{\gamma'} F_{00}(\alpha) e^{ik_1 r_2 \cos(\alpha - \theta)} d\alpha + U(\theta - \theta_p) \varphi^{(0)},$$

$$\varphi^{(0)} = -\frac{k_1 \beta}{2} H_0^{(1)}(k_1 r \sqrt{1 - \beta}) e^{-ik_1 \beta(x_2 + y_2)}, \quad (8)$$

где $U(x)$ - означает ступенчатую функцию

$$U(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ \frac{1}{2}, & \text{если } x = 0. \\ 0, & \text{если } x < 0 \end{cases}$$

Следовательно, соотношение $P_D^{(0)} = U(\theta - \theta_p) \varphi^{(0)}$, образует дискретный спектр монополя. Выражение

$$P_H^{(0)} = \frac{e^{ik_1 r_1}}{4\pi r_1} + \frac{ik_1}{8\pi} \int_{\gamma'} F_{00}(\alpha) e^{ik_1 r_2 \cos(\alpha - \theta)} d\alpha \quad (9)$$

формирует непрерывный спектр. Так как

$$G = P_H^{(0)} + P_\partial^{(0)}, \quad (10)$$

то из (10), (4) находим

$$P_{i_1, i_2, \dots, i_N}^{(N)} = P_{H_{i_1, \dots, i_N}}^{(N)} + P_{\partial_{i_1, \dots, i_N}}^{(N)},$$

$$\text{где } P_{H_{i_1, \dots, i_N}}^{(N)} = \frac{\partial^N P_H^{(0)}}{\partial y_{i_1} \partial y_{i_2} \dots \partial y_{i_N}}; \quad P_{\partial_{i_1, \dots, i_N}}^{(N)} = \frac{\partial^N P_\partial^{(0)}}{\partial y_{i_1} \partial y_{i_2} \dots \partial y_{i_N}} \quad (11)$$

описывают непрерывный и дискретный спектры звукового поля мультипольного источника N-порядка вблизи локально реагирующей поверхности.

При подстановке (9) в (11) получаем интегралы типа

$$I'_{nm} = \int_{\gamma'} F_{nm}(\alpha) e^{ik_1 r_2 \cos(\alpha - \theta)} d\alpha, \quad (12)$$

$$F_{nm} = \Gamma(\alpha) \cos^m \alpha \sin^{n+1} \alpha H_n^{(1)}(k_1 r \sin \alpha) e^{-ik_1 r \sin \alpha}$$

Точно через известные специальные функции интеграл (12) не выражается, поэтому необходимы асимптотические оценки этого интеграла. При $k_1 r_2 \gg 1$ вид интеграла (12) удобен для отыскания асимптотического разложения методом перевала.

Модифицированный метод перевала позволяет получить следующую равномерную асимптотическую оценку интеграла I_{nm}

$$I_{nm} = (-i)^n \frac{2}{ik_1} \sin^n \theta \cos^m \theta \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} \left\{ b_{nm} \sqrt{\pi} e^{\tau^2} \operatorname{erfc}(\tau) + \left[\Gamma(\theta) - \frac{b_{nm}}{\tau} \right] + \frac{1}{ik_1 r_2} \left[\frac{b_{nm}}{2\tau^3} ik_1 r_2 + \Gamma(\theta) S_{nm} - \frac{2\beta(1 + \beta \cos \theta)}{(\cos \theta + \beta)^3} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2\beta(n \cos^2 \theta - m \sin^2 \theta)}{\cos \theta (\cos \theta + \beta)^2} \right] + \frac{1}{(ik_1 r_2)^2} [\dots] + O \left[\frac{1}{(ik_1 r_2)^j} \right] \right\}, \quad (13)$$

Воспользовавшись соотношением (13), получим равномерные асимптотические представления звуковых полей дипольных и квадрупольных источников вблизи локально реагирующей поверхности.

$$P_j^{(1)} = P_{\Gamma_j}^1 - ik_1 \frac{\partial r_2}{\partial y_j} \frac{e^{ik_1 r}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) b_{10} + \frac{2\beta}{ir_1 r_2} (L - B \cos \theta) + O \left[\frac{1}{(ik_1 r_2)^2} \right] \right\}$$

$$P_2^{(1)} = P_{\Gamma_2} - ik_1 \frac{\partial r_2}{\partial y_2} \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) b_{01} + \frac{2\beta}{ik_1 r_2} \left(L - B \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) + O[\dots] \right\}$$

$$P_{22}^{(2)} = P_{\Gamma_{22}}^{(2)} + k_1^2 \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_2} \right)^2 \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) b_{02} + \frac{2\beta}{ik_1 r_2} \left(L - 2B \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) + O[\dots] \right\}$$

$$P_{j2}^{(2)} = P_{\Gamma_{j2}}^{(2)} + k_1^2 \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_j} \right) \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_2} \right) \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) b_{11} + \frac{2\beta}{ik_1 r_2} \left(L + B \frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} \right) + O \left[\frac{1}{(ik_1 r_2)^2} \right] \right\}$$

$$P_{13}^{(2)} = P_{\Gamma_{13}}^{(2)} + k_1^2 \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_1} \right) \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_3} \right) \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) \left(b_{20} - \frac{b_{10}}{k_1^2 r_2} \right) + \frac{2\beta}{ik_1 r_2} (L + 2B \cos \theta) + O \left[\frac{1}{(ik_1 r_2)^2} \right] \right\}$$

$$P_{ij}^{(2)} = P_{\Gamma_{ji}}^{(2)} + k_1^2 \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_j} \right)^2 \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2} \left\{ A(\tau) \left[b_{20} - \frac{b_{10}}{k_1^2 r_2} \left(\left(\frac{\partial r_2}{\partial y_j} \right)^2 - 1 \right) \right] + \frac{2\beta}{ik_1 r_2} (L + 2B \cos \theta) + O \left[\frac{1}{(ik_1 r_2)^2} \right] \right\},$$

где $P_{\Gamma_n}^{(i)} = ik_1 \frac{\partial r_1}{\partial y_n} \Phi_n^{(i)}(r_1) \frac{e^{ik_1 r_1}}{4\pi r_1} + ik_1 \frac{\partial r_2}{\partial y_n} \Phi_n^{(i)}(r_2) \Gamma(\theta) \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2}$;

$$B = (\cos \theta + \beta)^{-2}$$

$$P_{\Gamma_{nl}}^{(2)} = -k_1^2 \left(\frac{\partial r_1}{\partial y_n} \right) \left(\frac{\partial r_1}{\partial y_l} \right) \Phi_{nl}^{(2)}(r_1) \frac{e^{ik_1 r_1}}{4\pi r_1} - k_1^2 \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_n} \right) \left(\frac{\partial r_2}{\partial y_l} \right) \Phi_{nl}^{(2)}(r_2) \Gamma(\theta) \frac{e^{ik_1 r_2}}{4\pi r_2}$$

$$A(\tau) = \frac{1}{\tau} \left[F(\tau) - \frac{1}{e\tau^2} \right]; \quad F(\tau) = 1 - \sqrt{\pi} \tau e^{\tau^2} \operatorname{erfc}(\tau); \quad L = \frac{1 + \beta \cos \theta}{(\cos \theta + \beta)^3}.$$

$$\Phi_n^{(1)} = \left(1 - \frac{1}{ik_1 r} \right); \quad \Phi_{nl}^{(2)} = \left(1 - \frac{3}{ik_1 r} + \dots \right);$$

$$\Phi_{nl}^{(2)} = \left(1 - \frac{3}{ik_1 r} + \frac{3}{(ik_1 r)^2} + \delta_{nl} \left(\frac{\partial r}{\partial y_n} \right)^{-1} \left(\frac{\partial r}{\partial y_l} \right)^{-1} \left[\frac{1}{ik_2 r} - \frac{1}{(ik_1 r)^2} \right] \right).$$

Данные соотношения описывают звуковые поля дипольных и квадрупольных источников во всех характерных для этой задачи областях изменения геометрических параметров и импеданса поверхности (из рассмотрения исключается случай, когда источник и приемник находятся вблизи импедансной поверхности на малом расстоянии друг от друга).

Известно, что механизм генерации звука реактивной струей включает два типа взаимодействия: турбулентность-турбулентность, градиент средней скорости - турбулентность. Два типа взаимодействия обуславливают "собственный" и "сдвиговой" шум газового потока. Для звукового поля реактивной струи вблизи поверхности земли можно записать:

$$P(\vec{x}, \omega) = P_{cдв} + P_{соб};$$

где "сдвиговой" и "собственный" шум определяются выражениями

$$P_{cдв} = - \int_V F_j \frac{\partial G}{\partial y_i} dV, \quad P_{соб} = \int_V T_{ij} \frac{\partial^2 G}{\partial y_i \partial y_j} dV. \quad (14)$$

Считаем, что ось струи параллельна поверхности. В этом случае после подстановки производных от функции Грина в (14) получим

$$P_{cдв} = - \frac{ik_1}{4\pi} \int_V F_2 \Phi_1^{(1)}(r_1) \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1} dV - \frac{ik_1}{4\pi} \int_V F_2 Q_1^{(1)} \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} dV, \quad (15)$$

$$P_{соб} = - \frac{k_1^2}{4\pi} \int_V T_{ij} \Phi_{ij}^{(2)}(r_1) \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1} dV - \frac{k_1^2}{4\pi} \int_V T_{ij} Q_{ij}^{(2)} \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} dV. \quad (16)$$

Анализ звукового поля реактивной струи, проведенный на основе соотношений (15), (16), показал, что звуковое поле дозвуковой реактивной струи вблизи земной поверхности определяется в основном наличием прямой, отраженной и поверхностной волны. В случае чистой упругости за счет возбуждения поверхностных волн шум реактивной струи в дальнем поле может существенно усиливаться. При касательных углах падения для поверхности неупругого типа имеем избыточное ослабление шума струи.

Список литературы

1. Chien C.F. and Soroka W.W. Sound propagation along an impedance plane // J. Sound and Vibr. 1975. V. 43. № 1. P. 9-20.
2. Леонтьев Е.А. О влиянии земли на распространение звука // Тез. докл. VII научн.-техн.конф. по аэроакустике. Суздаль: ЦАГИ, 1981. С.178-179.
3. Генералов А.В., Загузов И.С., Калабухов В.Н. Особенности расчета шума струи ТРДД в условиях свободного звукового поля // Доклады на VIII научно технической конференции по аэроакустике/ ЦАГИ, Москва, 1986. С . 73 - 75

О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ОБУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА «ФЕСТО-ДИДАКТИК»

Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д., Кашапов И.Д., Ермошкин А.З.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Особенности экономического развития Самарского региона сделали весьма актуальной и своевременной организацию подготовки инженеров по специальности 121100 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика».

Следует заметить, по данным источника [1] в США, Японии и Западной Европе в сфере автоматического управления занято около 150 тыс. инженеров. При этом только в США за счет автоматизации производства извлекается дополнительный доход более 50 миллиардов долларов в год [1]. Кроме того, интеграция электронных систем управления с гидравлическими и пневматическими приводами привела в Западной Германии к созданию новой специальности - мехатроники, по которой организована подготовка инженеров [2].

Специальность 121100 - "Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика" - область науки и техники, которая включает в себя совокупность научных и технических знаний, средств, способов и методов решений комплексных задач, связанных с исследованием, проектированием, производством, испытанием и эксплуатацией гидравлических машин, гидропневмоприводов и систем автоматического управления и контроля, базирующихся на применении разнообразных по функциональному назначению элементов.

Можно с уверенностью сказать, что практически любая машина или энергетическая установка имеют в своём составе элементы гидропневмопривода или устройства гидропневмоавтоматики.