

УДК 534.836

Г.И. СОКОЛ

Днепропетровский национальный университет им. Олесь Гончара, Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ЛЭМБА

Представлен аналитический анализ связи характеристик внутрикамерного процесса и акустического поля двигательных установок (ДУ). Обоснован механизм возникновения акустического поля ДУ на основе представлений Лэмба. Предлагаемая методика расчета шума ДУ позволяет сделать вывод, что шум ДУ зависит от пары компонентов топлива, их расхода, коэффициентов соотношения компонентов, качества рабочего процесса в камере сгорания и ее конструктивных данных, расхода и скорости истечения продуктов сгорания. Амплитуда составляющих спектра шума сильно зависит от пары компонентов топлива, на которых работает двигательная установка. Проведены измерения характеристик акустического поля, генерируемого при работе на месте пульсирующей камеры. Акустическое поле возбуждалось периодически следующими струями. Приведены результаты расчета величины звукового давления в первой гармонике шума в окружающей воздушной среде в дальнем акустическом поле. Построена характеристика направленности первой гармонике, как наиболее энергонесущей.

Ключевые слова: акустическое поле, звуковое давление, направленность, двигательные установки.

Введение

Актуальной проблемой современного двигателестроения в авиационной и ракетной техниках является исследование взаимосвязи характеристик процессов горения, смешения, истечения, конструктивных параметров двигателей и шума в окружающей среде. Шум характеризуется величиной звукового давления и частотным диапазоном отдельных гармоник. Результаты экспериментальных и теоретических исследований довольно широко представлены в работах [1 - 3], но только для отдельных задач. В [1] представлены расчеты уровня шума при горении топлива в двигателе. Он определяется скоростью истечения горючего, турбулентностью поступающей воздушной струи, размерами камеры сгорания, массой горючего материала. Уравнение энергии процесса горения в камере сгорания не приведено, нет анализа зависимости звукового давления от характеристик внутрикамерного процесса. Для расчета уровня шума при горении топлива в камере сгорания газотурбинного двигателя [1] использован эмпирический коэффициент, равный 48 или 64 в зависимости от типа двигателя. Связь уровня шума со скоростью потока, соотношением расходов воздуха и топлива указана косвенным путем. Особенностью [3] является учет шума от ударных волн в общем шуме струи турбореактивных двигателей. В основе методик расчета акустической мощности реактивной струи, применяемых на

практике для оценки шума самолетов, лежат также эмпирические зависимости [1].

В монографиях и учебной литературе по динамике жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) приводятся данные о нестационарных режимах работы двигательных установок (ДУ) в некоторые промежутки времени и изменяющемся во времени характере тяги [4, 5]. Но связь характеристик тяги и акустического поля не исследована. Актуальность решения проблемы о механизме возникновения шумов при работе ДУ состоит в том, что в настоящее время мощности двигателей значительно возросли. Необходимость исследования спектрального состава шумов, особенно вклада низкочастотных составляющих, обусловлена вредным физическим и психологическим действием на людей, здания и сооружения.

Целью настоящей работы является моделирование звукового поля ДУ, составление методики расчета звукового давления и характеристики направленности гармонических составляющих шума аналитическим путем, выявление связи между амплитудой звукового давления в дальнем поле и характеристиками процессов горения, смешения, истечения, конструктивными параметрами двигателей.

1. Постановка задачи

Главной составной частью ДУ является камера сгорания, в которую подаются ком-

поненты топлива. Источником располагаемой энергии ДУ является химическое превращение компонентов топлива в продукты сгорания, истечение которых происходит через сопло. В результате возникает сила тяги. Возмущения в среде от среза сопла двигателя, вызванные действием силы тяги $P(t)$, распространяются в области атмосферы, ранее находящейся в покое. Выражение для силы тяги $P(t)$ записано в зависимости от времени, так как рассматривается случай нестационарного режима работы ДУ.

Из третьего закона Ньютона следует, что двигатель в свою очередь действует на среду с равной по величине и противоположно направленной силой. Для решения задачи о формировании звукового поля ДУ используем методику, созданную Л.Я.Гутиным для расчета характеристик звукового поля воздушного винта [6]. В своей работе Л.Я.Гутин предложил генерирование в воздушной среде звукового поля объяснить действием на среду некоторой силы, обусловленной взаимодействием тела в виде вращающейся лопасти винта и средой. При этом Л.Я.Гутин использовал представление Лэмба о том, что в случае формирования звукового поля сосредоточенная сила эквивалентна акустическому диполю [6, 7]. В случае ДУ силу, действующую на среду при истечении продуктов сгорания, обозначим $R(t)$.

Поместим начало координат в плоскости среза сопла и направим ось x вдоль оси ДУ латерального аппарата.

Граничные условия задачи:

при $x = 0$ на окружающую воздушную среду действует сила $R(t)$. (1)

В начальный момент времени давление в среде равно атмосферному p_H , а колебательный процесс отсутствует.

Начальные условия для определения характеристик звукового поля через звуковое давление p и колебательную скорость V_K запишутся в виде

$$p_0(0, x) = p_H \quad V_K = 0, \quad (2)$$

где p – звуковое давление в среде;

p_H – атмосферное давление;

V_K – колебательная скорость звукового процесса.

2. Математическая модель

Получим выражение для силы $R(t)$ в определенный «застывший» момент времени. Точку приложения силы мысленно сосредоточим в одной плоскости – плоскости среза сопла. Пусть $A(R)RdRd\Theta$ – элементарная сила, приложенная к элементу среды $RdRd\Theta$ на срезе сопла. Здесь обозначено: R – расстояние от оси сопла до

элемента, dR – радиальная длина выбранного элемента, $d\Theta$ – его ширина, R_0 – радиус сопла на срезе. Сила $A(R)RdRd\Theta$ параллельна оси и обратна направлению тяги. Тогда

$$\int_0^{R_0} A(R) R dR \int_0^{2\pi} d\Theta = \iint_S dp = P = \frac{G_2}{g} W_c, \quad (3)$$

где G_2 и W_c – расход и скорость истечения продуктов сгорания на срезе сопла соответственно;

g – ускорение свободного падения.

Рассмотрим отрезок времени, когда сила тяги имеет нестационарный характер и ее можно описать непрерывной функцией. Эта функция может носить периодический характер, или ее можно разбить на некоторые участки, которые имеют периодичность. Характеристику силы тяги, периодически изменяющуюся во времени, имеет пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ПуВРД). Поэтому дальнейшее решение задачи о генерировании звукового поля двигателями будем связывать с звуковым полем ПуВРД, работающим на месте.

Если периодическая функция с периодом T в интервале t , $t + T$ имеет конечное число максимумов и минимумов, а в точках разрывов удовлетворяет условию Дирихле

$$f(t) = \frac{f(t-0) + f(t+0)}{2},$$

то она может быть представлена в виде ряда Фурье [8], который записывают в форме

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{2m\pi t}{T} - \alpha_m\right),$$

где m – номер гармоники;

A_0, A_m – коэффициенты ряда;

α_m – фаза;

T – период;

t – время.

В случае отсутствия явной периодичности для анализа процесса следует применить интеграл Фурье.

Рассмотрим цикл работы ПуВРД. Источником располагаемой энергии ПуВРД является химическое превращение компонентов топлива в продукты сгорания, истечение которых из камеры сгорания через сопло вызывает силу тяги.

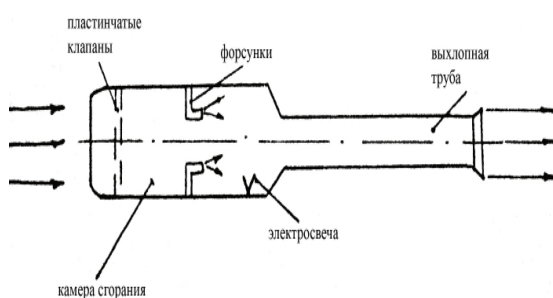


Рис. 1. Конструктивная схема ПуВРД

В отличие от проточных воздушно-реактивных двигателей воздух поступает в камеру сгорания ПуВРД циклически. Периодическое поступление воздуха в камеру сгорания ПуВРД осуществляется при помощи специальных запорных клапанов. После впрыска горючего смесь поджигается. Температура и давление сгорающих продуктов повышаются, клапаны на входе закрываются, и происходит истечение высокотемпературных газов из двигателя. Это приводит к понижению давления в камере сгорания, клапаны открываются вновь. Поступает новая порция воздуха, и весь цикл повторяется вновь.

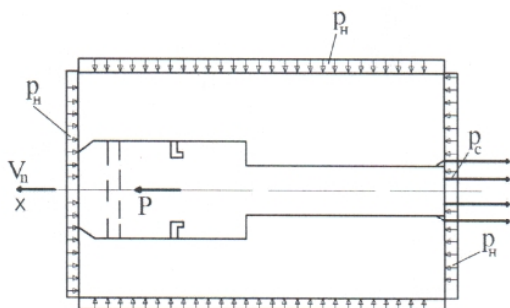


Рис. 2. Схема сил

P – сила тяги, V_n – направление скорости полета, p_c – давление истекающих продуктов сгорания на срезе сопла, p_n – давление в окружающей среде

Запишем основные выражения, характеризующие работу ПуВРД, на основе известных из двигателестроения [9]. Для определения силы, с которой ПуВРД воздействует на среду при своей работе, применим известный метод, основанный на теореме импульсов. С этой целью окружим головку двигателя контрольной поверхностью и изобразим внешние силы, действующие на выделенный контур жидкости. Формально задача сводится к определению силы, которая действует на тело внутри жидкости, ограниченной контрольной поверхностью. В нашем случае телом является двигатель, а силой, действующей на него – тяга P , жидкостью – воздух. Запишем алгебраическую сумму про-

екций всех внешних сил на ось в i -тый момент времени (см.рис.2).

$$P_x = P + F_c(p_c - p_n), \quad (4)$$

где P_x – равнодействующая всех сил в проекции на ось x ;

F_c – площадь среза сопла;

p_c – давление истекающих продуктов сгорания на срезе сопла.

Эта сумма сил должна быть приравнена изменению количества движения в пределах контура, то есть количеству движения, выносимому вытекающей струей из контрольной поверхности в тот же момент времени.

В результате имеем для i -того момента времени

$$P = \frac{G_2}{g} W_c - \frac{G_B}{g} V_{II} + F_c(p_c - p_n), \quad (5)$$

где G_B – секундный расход воздуха, втекающего в двигатель;

V_{II} – скорость полета.

Количество газов, истекающих из сопла двигателя, меняется во времени, поэтому в нашем случае G_2 и W_c являются функциями времени. При работе двигателя на месте $V_{II} = 0$, поэтому член с V_{II} в уравнении (5) далее может не учитываться. Считаем, что сопло работает в расчетном режиме $p_c = p_n$. Тогда уравнение (5) переписывается в виде

$$P(t) = \frac{G_2}{g} W_c(t). \quad (6)$$

Если опорожнение камеры сгорания двигателя происходит в надкритическом режиме,

$$p_0 \leq p_k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (7)$$

Расход газов определяется из выражения согласно [9]

$$G_2(t) = \mu_k F_{kp} p_k(t) \sqrt{\frac{k}{R_k T_k(t)} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (8)$$

где $p_k(t)$ – переменное давление в камере сгорания двигателя;

k – показатель адиабаты;

μ_k – коэффициент расхода;

R_2 – газовая постоянная;

$T_k(t)$ – переменная температура газов в камере сгорания;

$F_{кр}$ – площадь критического сечения сопла.

При докритическом режиме опорожнения

$$p_0 \geq p_k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (9)$$

расход газов определяется из выражения

$$G_2(t) = \mu_k F_{кр} p_k(t) *$$

$$* \sqrt{\frac{2}{R_k T_k(t)} \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{p}{p_k(t)}\right)^{\frac{2}{k}} * \left(\frac{p}{p_2(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}$$

Аналитическое выражение для силы, с которой струя, истекающая из сопла ПуВРД, воздействует на среду на основе (6), имеет вид

$$|R(t)| = \left| \frac{G_2(t)}{g} \cdot W_c(t) \right| \quad (10)$$

Указанные важные характеристики определяются из решения уравнения динамики камеры сгорания ПуВРД. Это уравнение для работы двигателя на месте аналогично уравнению динамики камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей [9] и записывается в виде

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{k-1}{V_k} (i_1 G_1 - i_2 G_2 + \frac{dQ}{dt}), \quad (11)$$

где V_k – объем камеры сгорания;

Q – количество подводимого тепла к газу извне;

i_1 – энтальпия компонентов, поступающих в камеру сгорания;

i_2 – энтальпия газов, вытекающих из камеры сгорания;

G_1 – расход компонентов топлива, поступающих в камеру сгорания.

Из (11) видно, что давление в камере сгорания зависит от вида топлива, коэффициента соотношения компонентов, их расхода и объема камеры сгорания. Этими характеристиками определяется воздействие ДУ на окружающую среду силой $R(t)$.

Максимальное значение температуры газов в камере сгорания обусловлено парой компонентов топлива, выбранных для работы двигателя, и коэффициентом соотношения компонентов [9].

Скорость истечения продуктов сгорания определяется из известного соотношения

$$W_c(t) = \lambda_{кр}(T_c) a_{кр}(T_{кр}), \quad (12)$$

где T_c – температура продуктов сгорания на срезе сопла;

$T_{кр}$ – температура газов в критическом сечении сопла;

$a_{кр}$ – скорость звука в критическом сечении;

$\lambda_{кр}$ – газодинамическая функция.

Обе функции зависят от давления газов в камере, а значит, в нашем случае также зависят от времени.

Вернемся к постановке основной задачи. Так как функция давления в камере ПуВРД есть периодическая, то и $G_2(t)$ и $W_c(t)$ являются функциями периодическими, а значит, и сила $R(t)$ – периодическая. Эту силу мы можем разложить в ряд Фурье [8].

$$|R(t)| = \begin{cases} R(t) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau \leq t \leq T \end{cases} =$$

$$= \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{2m\pi t}{T} - \alpha_m\right) + \frac{A_0}{2}, \quad (13)$$

где τ – время, в течение которого происходит выброс продуктов сгорания в атмосферу;

$A_0/2$ – начальная амплитуда процесса;

A_m – амплитуда отдельных гармоник;

α_m – фаза процесса;

m – номер гармоники, $m = 1, 2, 3, \dots, 6$;

ω_m – круговая частота.

Значение силы $R(t)$ в промежутке $\tau \leq t \leq T$ известно из (10). Действие на среду происходит только в промежутке времени τ и обусловлено повышением давления в камере сгорания вследствие сгорания компонентов топлива.

Определяем коэффициенты ряда Фурье

$$A_m = \frac{2\tau}{T} R(t),$$

$$A_0 = \frac{\tau}{T} R(t) \quad (14)$$

Выражение для силы, вызывающей волновой процесс в атмосфере на основе представлений Лэмба имеет вид [6]

$$X = -\frac{2\tau}{T} R(t) e^{-ikt} e^{-ikm}, \quad (15)$$

где k – волновое число;

c – скорость звука в окружающей воздушной среде;

m – номер гармоники.

А потенциал скоростей, обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X, Y, Z , записывается как [6]

$$\varphi = \frac{i}{4\pi r k c} \left(X \frac{\partial}{\partial x} + Y \frac{\partial}{\partial y} + Z \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad (16)$$

где r – расстояние от источника звука до некоторой точки в звуковом поле;
 ρ – плотность воздушной среды;
 x, y, z – координаты.

Для нашего случая одной силы, действующей на окружающую среду вдоль оси ДУ, совпадающей с координатой ox , выражение для потенциала имеет вид

$$\varphi = \frac{i}{4\pi r k c} X \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{e^{-ikr}}{r} . \quad (17)$$

После преобразования

$$\varphi = \frac{i}{4\pi r k c} X \left(\frac{1}{r^2} + \frac{ik}{r} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}$$

Запишем выражение для звукового давления p

$$p = \left| \rho \frac{d\varphi}{dt} \right| = \frac{\omega_m \tau}{2\pi c T} R(t) \cos \theta \left(\frac{1}{z} \cos z + \sin z \right), \quad (18)$$

где θ – угол характеристики направленности;
 $z = kr$.

В (18) записана только действительная часть звукового давления, так как нас интересует полезная часть излучаемой мощности. Акустическую мощность определяем на основе выражения из [6]

$$W = \int_0^n \frac{p^2}{2\rho c} 2\pi r^2 \sin \theta d\theta, \quad (19)$$

где n – число импульсов двигателя за выделенный промежуток времени.

3. Анализ полученных результатов

Вид периодической функции звукового давления в атмосфере при действии на среду вытекающих струй из высокоскоростных продуктов сгорания ПуВРД с частотой 1,5 Гц был получен экспериментально в [10]. Там же выполнено разложение периодической функции $p_k(t)$ в ряд Фурье и определены ее гармонические составляющие. Вид периодической функции звукового давления в атмосфере $p(t)$ при действии на нее вытекающих струй из высокоскоростных продуктов сгорания ПуВРД был также получен экспериментально и представлен [10].

Характеристика направленности первой гармоники в спектре шума ДУ представлена на рис.3. За единицу принято значение звукового давления, равное 2,4 Па или 100 дБ. Значение измеренного звукового давления шумомером

составило $p = 170$ Па, частота основного тона 20 Гц, $\tau = 10$ мс, $\tau / T = 0,2$.

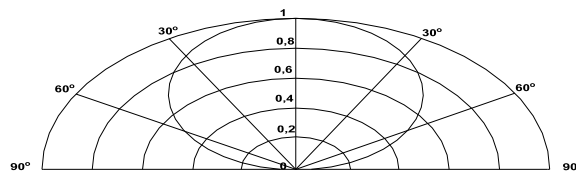


Рис.3. Характеристика направленности первой гармоники в спектре шума ДУ

5. Обсуждение результатов

Из рисунка 3 видно, что изменение звукового давления акустического поля пульсирующих двигательных установок имеет ярко выраженную характеристику направленности. Это обусловлено тем, что выражение для потенциала, описывающее акустическое поле, записано с учетом представлений Лэмба, где учтено действие на окружающую среду сосредоточенной силы.

Заключение

Обоснована структура акустических полей в воздушной среде при работе двигательных установок. Конкретным примером явилось исследование акустического поля пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, работающего на месте.

Предлагаемая методика расчета шума ДУ позволяет провести расчет звукового давления в окружающей среде, определить амплитудный и частотный состав отдельных гармонических составляющих, построить их характеристику направленности.

На основе изложенной теории можно сделать вывод, что шум ДУ зависит от пары компонентов топлива, их расхода, коэффициентов соотношения компонентов, качества рабочего процесса в камере сгорания и ее конструктивных данных, скорости истечения продуктов сгорания на срезе сопла. Амплитуда составляющих спектра сильно зависит от пары компонентов топлива, на которых работает двигательная установка.

Литература

1. Снижение шума самолетов с реактивными двигателями [Текст] / под ред. докт. техн. наук А.М. Мхитаряна. - М.: Машиностроение, 1975. – 264 с.
2. Воздушно-реактивные двигатели [Текст] / под ред. докт. техн. наук С.М. Шляхтенко. - М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.
3. Справочник по технической акустике [Текст] / под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. - Л.: Судостроение, 1980. – 440 с.

4. Жидкостные ракетные двигатели, двигательные установки, бортовые источники мощности, разработанные КБ двигательных установок ГП КБ «Южное» [Текст] / под науч. ред. акад. С.Н. Конюхова, канд. техн. наук В.Н. Шнякина. - Д.: ГП КБ «Южное», 2008. - 466 с.
5. Нечаев Ю.Н. Термодинамический анализ рабочего процесса пульсирующих детонационных двигателей: автореф. канд. техн. наук: 05.07.05 / Нечаев Ю.Н. - М., ВВИА, 2002. - 56 с.
6. Гутин Л.Я. Избранные труды [Текст] / Л.Я. Гутин. - Л.: Судостроение, 1977. - 537 с.
7. Ультразвук: Малая энциклопедия [Текст] / под ред. Г.Я. Голяминой. - М.: Наука, 1983. - 400 с.
8. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука, 1986. - 554 с.
9. Махин Л.В. Динамика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Л.В. Махин, В.Ф. Присняков, Н.П. Велик. - М.: Машиностроение, 1969. - 334 с.
10. О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя [Текст] / Косько И.К., Сокол Г.И.; Днепропетровский государственный университет. - Д., 1980. - 16с. - Деп. ВВИНИТИ 10.10.80, № 4326-80.

Поступила в редакцию 30.05.2013

Г.І. Сокол. Рішення задачі про визначення характеристик акустичних полів двигунних установок на ґрунті представлень Лэмбу

Представлено аналітичний аналіз зв'язку характеристик процесу у камері та акустичного поля двигунних установок (ДУ). Обґрунтовано механізм виникнення акустичного поля ДУ на ґрунті представлень Лэмбу. Запропонована методика розрахунку шуму ДУ дозволяє зробити висновок, що шум ДУ залежить від пари компонентів палива, їх витрати, коефіцієнтів відношення компонентів, якості робочого процесу в камері згоряння та її конструктивних даних, витрат та швидкості витікання продуктів згоряння. Амплітуда складових спектру шуму сильно залежить від пари компонентів палива, на яких працює двигуна установка. Проведені виміри характеристик акустичного поля, що генерується при роботі на місці пульсуючої камери. Акустичне поле збуджувалося періодично слідкуючими струмами. Наведені результати розрахунку величини звукового тиску у першій гармоніці шуму в оточуючому повітряному середовищі у далекому акустичному полі. Побудована характеристика спрямованості першої гармоніки, як найбільш енергонесучої.

Ключові слова: акустичне поле, звуковий тиск, спрямованість, двигунні установки.

G.I. Sokol. Solution of the problem determining of the acoustic fields characteristics of the propulsion systems based on the concepts Lamb

The analytical analysis of the relationship between the characteristics in-chamber process and in the acoustic field of propulsions is presented. The mechanism of of acoustic field occurrence on the basis of representations of Lamb is justified. The proposed method of calculating noise control of the propulsions can be concluded that the noise control of the propulsions depends on a couple of fuel components, their flow coefficient ratio of the components, the quality of the working process in the combustion chamber and its design data and flow velocity of the combustion products. The amplitude spectrum components noise strongly depends on the pair of fuel components, which works propulsion. The measurements of the generating acoustic field when on-site pulsating chamber is working are conducted. The acoustic field excited by periodically following jets. The results of calculation of the value of sound pressure in the first harmonic noise in the ambient air in the far acoustic field are presented. Directional characteristic of the first harmonic as the most energy-carrying is built.

Key words: acoustic field, sound pressure, orientation, engine installation.