

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ ЗАПУСКАХ РАКЕТ

Г. И. СОКОЛ

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара,
физико-технический факультет
49010 г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 72
Тел. (056) 373-12-60 Fax: (056) 374 98 41
E-mail: gsokol@ukr.net*

Разработана методология исследований акустического излучения при движении ракеты. Сформулированы задачи: разработка физических моделей акустических полей, характер которых зависит, прежде всего, от типа акустических источников; создание математических моделей, предназначенных для расчета амплитудно-частотных характеристик. Показано, что акустическое поле при работе двигательной установки ракеты имеет направленность.

ВВЕДЕНИЕ

При движении ракеты в атмосфере после ее запуска возникают разнообразные по характеру излучения и мощности акустические поля. Одним из актуальнейших исследований здесь является проведение анализа и оценки уровней инфразвукового излучения, его влияния на здоровье населения близ лежащих населенных пунктов и обслуживающего персонала космодромов. Поэтому необходимо выявить особенности и определить направления исследований акустического излучения на основе существующих представлений о генерировании, распространении и воздействии не только звуковых волн, но и инфразвука.

Методология исследований акустического излучения при движении ракеты включает: выявление как первичных источников акустических колебаний, то есть, колебаний от работающей двигательной установки, от колеблющейся под действием вибраций оболочки корпуса, от турбулентных вихрей в потоке, обтекающего корпус, так и вторичных источников акустических колебаний, возникающих вследствие отражения колебаний, генерируемых первичными источниками, от столкновения с преградами, например, типа поверхности стартового стола. Важно также рассмотреть взаимодействие между собой акустических колебаний от различного вида источников.

Необходимо разработать физические модели акустических полей, характер которых зависит прежде всего от типа акустических источников.

Это модели:

- точечного излучения (монополей);
- анализ акустических полей, генерируемых в среде при силовом воздействии на жесткую поверхность, находящуюся в состоянии движения, и характеризующихся потенциалом Лэмба;
- акустического излучения и полей при колебаниях пластин и оболочек различной формы, протяженности и площади;
- - акустических излучений, возникающих при истечении струй из сопел;
- - акустического излучения, генерируемого при взаимодействии подвижной среды с поверхностями твердых тел различной формы;

- возбуждения и распространения акустических колебаний внутри газовых и жидкостных полостей с учетом особенностей конструктивных схем исполнения оболочек, выявление резонансов;
- монохроматического и импульсного излучения.

Далее следует создание математических моделей, предназначенных для расчета характеристик акустических полей (аналитические методы, применение рядов Тейлора и Фурье, методы численного программирования). Математические зависимости позволят провести анализ взаимосвязи энергетических характеристик источников акустического излучения с характеристиками их акустических полей. Важным является расчет амплитудно-частотной характеристики акустического излучения.

Известны работы [1-3], в которых рассмотрены аспекты максимальных акустических нагрузок на ракету при старте. Все они рассматривают отдельные конкретные частные задачи. Применены аналитические, экспериментальные методы исследований, а также проведено моделирование распространения акустических колебаний численными методами.

В проведении исследований важны экспериментальные проверки, разработка программ и методик для проведения измерений характеристик акустических колебаний. При этом составляется перечень оборудования, необходимого для проведения измерений акустических характеристик (приборы, схемы, оснастка).

В результате физического и математического анализа источников акустических колебаний, возможно разработка активных и пассивных методов их гашения.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ЛЭМБА

Появление шумов в окружающей среде при работе двигателей обусловлено различными причинами. Насущным вопросом современного двигателестроения является исследование взаимосвязи характеристик процессов горения, смешения, истечения, конструктивных параметров двигателей с уровнем генерируемых шумов в окружающей среде, то есть с величиной звукового давления в акустическом поле и частотным диапазоном отдельных гармоник. Результаты экспериментальных и теоретических исследований довольно широко представлены в работах [1-6]. В частности, отмечается, что уровень шума при горении определяется скоростью истечения горючего, турбулентностью поступающей воздушной струи, размерами камеры сгорания, массой горючего материала. Но уравнение энергии процесса горения в камере сгорания не приведено, нет анализа зависимости звукового давления в акустическом поле от характеристик внутрикамерного процесса.

В 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 давления в камере и тяги [7].

На рисунке 1 показано изменение давления в камере сгорания в период запуска ЖРД. Здесь I – предварительная (пусковая) ступень тяги, II – выход на промежуточную ступень тяги, III – промежуточная ступень, IV – переход на основную ступень.

Решение задачи аналитическим методом по исследованию зависимости характеристик акустического поля и изменением тяги приведено в [8-10] для случаев воздействия на окружающую среду возмущениями от пульсирующего воздушно-реактивного двигателя и ЖРД.

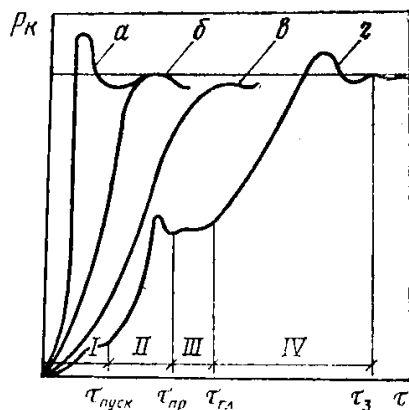


Рис. 1

Модель исследования строится на основании следующего положения: при работе двигательной установки возмущения в окружающей среде от среза сопла распространяются в области атмосферы, ранее находящиеся в покое.

В свое время для решения задачи о формировании звукового поля воздушного винта и расчета его характеристик Л.Я. Гутин [11] предложил объяснить генерирование в воздушной среде звукового поля действием 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.

При решении задачи о генерировании акустических полей работающими двигательными установками, и рассмотрев схему действующих сил, можно прийти к выводу, что возмущения в среде вызваны силой, противодействующей силе тяги $R(t)$. То есть, двигатель действует на среду с силой равной по величине и противоположно направленной силе тяги.

Выражение для силы тяги $P(t)$ в зависимости от времени может быть записано с учетом нестационарного режима работы ДУ, а также вибраций, присутствующих при работе двигателя. На рисунке 2 показана схема нагрузок на среду при работе двигателя. P – сила тяги, V_n – направление скорости полета, p_c – давление истекающих продуктов сгорания на срезе сопла, p_n – давление в окружающей среде, то есть атмосферное давление.

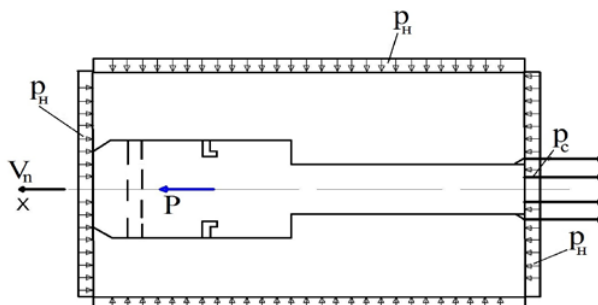


Рис. 2

В [8-10] приведены граничные и начальные условия для решения поставленной задачи. Решение задачи 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 проекций всех внешних сил на ось в i – тый момент времени (см. рис. 2).

$$P_x = P + F_c(p_c - p_H), \quad (1)$$

где P_x – равнодействующая всех сил в проекции на ось x ; F_c – площадь среза 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 для случая, когда двигатель работает на месте, имеем для i -того момента времени выражение для силы тяги

$$P(t) = \frac{G_2(t)}{g} W_c(t). \quad (2)$$

Аналитическое выражение для силы, действующей на среду, имеет вид

$$|R(t)| = \left| \frac{G_2(t)}{g} \cdot W_c(t) \right|, \quad (3)$$

Важные характеристики, представленные в (2) и (3), определяются из решения уравнения динамики камеры сгорания ДУ [12], которое записывают в виде

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{k-1}{V_k} (i_1 G_1 - i_2 G_2 + \frac{dQ}{dt}) \quad (4)$$

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, G_2 – расход компонентов топлива, вытекающих из камеры сгорания.

Скорость истечения продуктов сгорания определяется из известного соотношения [12]

$$W_c(t) = \lambda_{кр}(T_c) a_{кр}(T_{кр}), \quad (5)$$

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.

Вернемся к постановке основной задачи. Функцию, описывающую силу $R(t)$ разложим в ряд Фурье [13] и определим коэффициенты ряда. Выражение для силы, вызывающей волновой процесс в атмосфере на основе представлений Лэмба имеет вид [6]

$$X = -\frac{2\tau}{T} R(t) e^{-ikt} e^{-ikm}, \quad (6)$$

где k – волновое число; c – скорость звука в окружающей воздушной среде; m – номер гармоники, τ – промежуток времени, в течение которого отмечена пульсация тяги, T – период пульсаций тяги.

Потенциал скоростей, обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X , Y , Z , записывается по [6]. Для нашего случая одной силы, действующей на окружающую среду и направленной вдоль оси ДУ, выражение для потенциала имеет вид

$$\varphi = \frac{i}{4\pi\rho c s} \mathbf{X} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\mathbf{k}}{r} \right) \frac{e^{-i\mathbf{k}r}}{r}, \quad (7)$$

где r расстояние от источника звука до некоторой точки в звуковом поле; ρ – плотность воздушной среды.

Запишем выражение для звукового давления p

$$p = |\rho \frac{d\varphi}{dt}| = \frac{\omega_m \tau}{2\pi c T} \mathbf{R}(t) \cos \theta \left(\frac{1}{z} \cos z + \sin z \right), \quad (8)$$

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

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В [8] проведен расчет характеристики направленности акустического поля для случая возникновения акустических колебаний в среде при работе пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. Здесь в камере сгорания давление носит четкий пульсационный характер.

Получено, что изменение звукового давления акустического поля пульсирующих двигательных установок имеет ярко выраженную характеристику направленности, что представлено на рисунке 3. За единицу принято значение звукового давления, равное 2,4 Па или 100дБ. Значение измеренного шумомером звукового давления при эксперименте составило $p = 170$ Па, частота основного тона 20Гц, $\tau = 10$ мс, $\tau/T = 0,2$ [8].

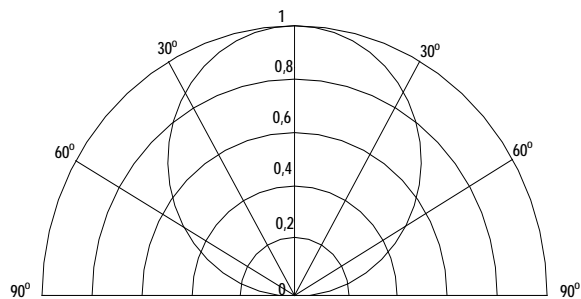


Рис. 3

Появление направленности в характеристике акустического поля обусловлено тем, что выражение для потенциала, описывающее акустическое поле, записано с учетом представлений Лэмба, где действие силы на среду, возникающей при работе ДУ, имеет вид сосредоточенной силы.

Расчет характеристик акустического поля реального ЖРД еще предстоит сделать на основании известных данных о характеристиках и параметрах двигательных установок. Настоящая работа имеет перспективный характер для выяснения уровней шумов при проектировании космодромов. В требованиях к строительству подобных сооружений вносится выявление воздействия шумов на окружающую среду инфразвукового излучения при запусках ракет-носителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено моделирование генерирования акустического поля в окружающей среде при работе ДУ ракеты, разработана методика расчета шума ДУ. Шум ДУ зависит от пары компонентов топлива, коэффициентов соотношения компонентов, качества рабочего процесса в камере сгорания и ее конструктивных данных, скорости истечения продуктов сгорания на срезе сопла и расхода истечения газов. Акустическое поле имеет выраженную направленность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев В. К., Думнов Г. Е., Комаров В. В., Мельников Д. А. О максимальных акустических нагрузках на ракету при старте. // Космонавтика и ракетостроение. Научно-технический ж. – 2000. – **19**. – С.44–55.
2. Tsutsumi S., Ishii T., Ut K., Tokudone S., Chiuou-ku Y., Wado K. Acoustic Design of Launch Pad for Epsilon Launch Vehicle // Proc. AJCPP2014 . Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 5-8, 2014, Jeju Island, Korea. – AJCPP2014-090.
3. Panda J., Mosher R., Porter D. J. Identification of Noise Sources during Rocket Engine Test Firings and a Rocket Launch a Microphone Phased-Array // NASA / TM-2013-216625, December 2013. – P. 1–20.
4. Снижение шума самолетов с реактивными двигателями / Под ред. д – ра техн наук Мхитаряна А. М. – М.: Машиностроение, 1975. – 264 с.
5. Петров С. К. Снижение шума при испытаниях жидкостных ракетных двигателей. / С.К. Петров: Диссертация ...к.т.н.: 01.04.06. Санкт-Петербург, 2002, 158 с.
6. Справочник по технической акустике / Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. – Л.: Судостроение. – 1980.
7. Присняков В. Ф. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и систем питания: Учебное пособие для студентов авиационных специальностей вузов – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
8. Косьюко И. К., Сокол Г. И. О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. – Днепропетровский государственный университет. – Днепропетровск, 1980. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ 10.10.80, № 4326-80.
9. Сокол Г. И. Решение задачи об определении характеристик акустических полей двигательных установок на основе представлений Лэмба / Г.И. Сокол. – Вестник двигателестроения. – 2013. – №2. – С.63–69.
10. Сокол Г. И. Моделирование характеристик акустических полей жидкостных ракетных двигателей на основе представлений Лэмба. // Проблемы высокотемпературной техники – Днепропетровск: Акцент ПП. – 2014. – с. 138–145.
11. Гутин Л. Я. Избранные труды. – Л.: Судостроение, 1977. – 537 с.
12. Махин Л. В. Присняков В. Ф., Белик Н. П. Динамика жидкостных ракетных двигателей – М.: Машиностроение, 1969. – 334 с.
13. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, гл. ред. физ-мат. лит, 1986. – 554 с.