

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С.Ю. КИРИЧЕНКО, Г.И. СОКОЛ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

Рассмотрены физические основы генерирования акустических полей при работе ветроэнергетических установок и пульсирующих воздушно-реактивных двигателей. Получены аналитические выражения, позволяющие проанализировать характеристики полей. Разработаны методики расчета для определения частот, звуковых давлений и характеристик направленности, представлен аналитический анализ связи характеристик внутрикамерного процесса и акустического поля двигательных установок.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой современного двигателестроения в авиационной и ракетной техниках является исследование шума. Как и при работе ВЭУ, шум пульсирующих двигателей характеризуется величиной звукового давления и частотным диапазоном отдельных гармоник. При анализе шума необходимо выяснить взаимосвязь характеристик процессов горения, смешения, истечения, конструктивных параметров двигателей и шума в окружающей среде.

Целью настоящей работы является моделирование звуковых полей пульсирующих двигателей и разработка методик, позволяющих рассчитать характеристики инфразвуковых акустических полей, которые генерируются ротором ветроэлектрической установки.

1. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИНФРАЗВУКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЕТРОКОЛЕСА

Рассмотрим элемент лопасти, расстояние до которого от оси ветроколеса равно R ; пусть dR – радиальная длина его и a – ширина, измеренная в проекции на плоскость вращения.

Силы, с которыми элемент воздействует на среду, обозначим: $A(R)dR$ и $B(R)$, dR направлена обратно вращательному движению ротора ветроагрегата.

$$n \int_0^{R_0} A(R) dR = n \int_0^{R_0} dP = P; \quad n \int_0^{R_0} B(R) dR = n \int_0^{R_0} dM = M,$$

где n – число лопастей; R_0 – длина лопасти; P – аэродинамическая сила, приводящая лопасть в движение; M – момент во вращательном движении лопасти.

Допустим, что силы равномерно распределены по ширине лопасти.

Если прохождение лопасти началось в момент времени $t=0$, то оно будет закончено во время τ . Периодически повторяющиеся с периодом T силы разложим в ряд Фурье

$$F_1(t) = \begin{cases} A(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots & (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots & (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - \varepsilon_m) + A_0;$$

$$F_2(t) = \begin{cases} B(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots \quad (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots \quad (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - \mu_m) + B_0.$$

Здесь θ – угол; $d\theta$ – элементарный угол в плоскости вращения; ε_m, μ – фазы; A_m, B_m – амплитуды гармоник; m – номер гармоники. При этом

$$A_m = \frac{2}{m\pi} A(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta \quad B_m = \frac{2}{m\pi} B(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta;$$

Нас интересуют первые гармоники, имеющие частоту инфразвука. Для первых гармоник имеем

$$A_m = \frac{n}{\pi} A(R) dR d\theta; \quad B_m = \frac{n}{\pi} B(R) dR d\theta.$$

Потенциал скоростей обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X, Y, Z . С учетом того, что точка наблюдения лежит в плоскости X, Y на расстоянии r

$$\phi = \frac{-i}{4\pi\rho kc} X \left(\frac{1}{2r} + \frac{ik}{r} \right) \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} x \Big|,$$

где ρ – плотность среды; k – волновое число; x – координата.

Выражение для звукового давления в дальнем акустическом поле имеет вид

$$p = \frac{m\omega_1}{2\pi cr} \left[-P \cos \vartheta + \frac{nc}{\omega_1 R_2^2} M \right] J_{mn}(kr \sin \vartheta). \quad (1)$$

Здесь ϑ – угол характеристики направленности; $x/r = \cos \vartheta$ – направление косинуса радиуса-вектора; ω_m – круговая частота каждой гармоники; r велико в сравнении с длиной волны и диаметром лопасти; где ωl – круговая частота основного тона.

Получены и построены кривые характеристик направленности первых инфразвуковых гармоник шума, излучаемого ветроколесом. Для проведения расчетов составлены алгоритм и программа на языке MAPLE. В расчет заложены следующие исходные данные: число оборотов ветроколеса 46,7; скорость звука в воздушной среде 340 м/с; сила аэродинамического сопротивления $P=50000$ Н; величина движущего момента 7000 Нм; число лопастей – 3; длина каждой лопасти – 10 м; Расстояние вдоль лопасти до точки приложения аэродинамической силы равно 7,5 м; плотность воздушной среды – 1,23 кг/см³. Из данных расчетов видно, что уровень звукового давления на расстоянии 300 м от ветроагрегата ВЭУ-250С он составляет менее 80 дБ. Эта цифра отвечает санитарным нормам.

Излучаемая акустическая мощность определяется из выражения

$$W = - \int_0^{\pi} \frac{p^2}{2\rho c} 2\pi r^2 \sin \vartheta d\vartheta \quad (2)$$

Из расчета по (2) следует, на акустическое излучение тратится 0,01 % от общей мощности ВЭУ.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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

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

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.

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, 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.

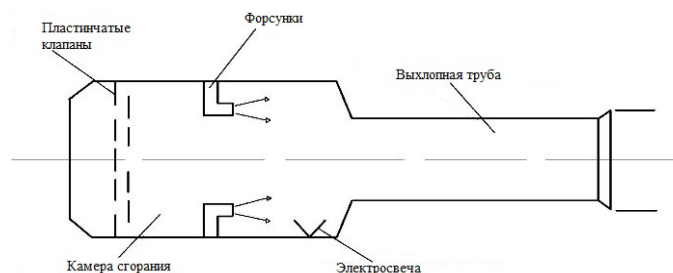


Рис. 1. Конструктивная схема ПуВРД

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 [Рис 1]. P – сила тяги; V_n – направление скорости полета; p_c – давление истекающих продуктов сгорания на срезе сопла; p_H – давление в окружающей среде

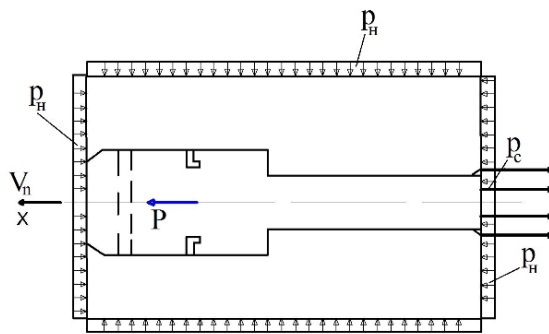


Рис. 2. Схема сил

Запишем основные выражения, характеризующие работу ПуВРД, на основе известных из двигателестроения [5]. 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. Запишем алгебраическую сумму проекций всех внешних сил на ось в i -й момент времени [Рис. 2].

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

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.

В результате имеем для i -го момента времени

$$P = \frac{G_2}{g} W_c - \frac{G_b}{g} V_n + F_c(p_c - p_H), \quad (5)$$

где G_b – секундный расход воздуха, втекающего в двигатель; V_n – 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 $V_n=0$, поэтому член с V_n в уравнении (5) далее может не учитываться. Считаем, что сопло работает в расчетном режиме $p_c=p_H$. Тогда уравнение (5) перепишем в виде

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

Если опорожнение камеры сгорания двигателя происходит в надкритическом режиме, то формула запишется в виде

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

Расход газов определяем из выражения согласно [3]

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

где $p_k(t)$ – переменное давление в камере сгорания двигателя; k – показатель адиабаты; μ_k – коэффициент расхода; R_k – газовая постоянная; $T_k(t)$ – переменная температура газов в камере сгорания; F_{kp} – 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

$$G_2(t) = \mu_{k_{кр}} p_k(t) * \sqrt{\frac{2}{R_k T_k(t)} \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{p}{p_k(t)}\right)^{\frac{2}{k}} * \left(\frac{p}{p_2(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

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

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

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 $R(t)$.

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 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.

$$|R(t)| = \begin{cases} R(t) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau \leq t \leq T \end{cases} = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{2m\pi t}{T} - \alpha_m\right) + \frac{A_0}{2}, \quad (13)$$

где τ – время, в течение которого происходит выброс продуктов сгорания в атмосферу; $A_0/2$ – начальная амплитуда; A_m – амплитуда отдельных гармоник; α_m – фаза процесса; m – номер гармоники; $m=1,2,\dots,6$; ω_m – круговая частота.

Значение силы $R(t)$ в промежутке $\tau \leq t \leq T$ известно из (10).

Определяем коэффициенты ряда Фурье

$$A_m = \frac{2\tau}{T} R(t), \quad A_0 = \frac{\tau}{T} R(t). \quad (14)$$

Выражение для силы, вызывающей волновой процесс в атмосфере на основе представлений Лэмба, имеет вид [3]

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

где k – волновое число; c – скорость звука в среде; m – номер гармоники.

Потенциал скоростей, обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X , Y , Z , записывают как [3]

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

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 x , выражение для потенциала имеет вид

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

После преобразования

$$\phi = \frac{i}{4\pi\rho kc} X \left(\frac{1}{r^2} + \frac{ik}{r} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}.$$

Запишем выражение для звукового давления p

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

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 [3]

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

где n – число импульсов двигателя за выделенный промежуток времени.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

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, $\tau/T=0,2$.

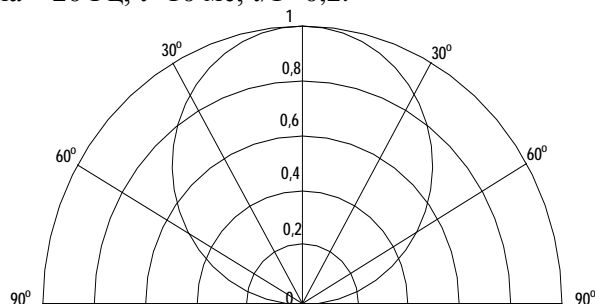


Рис. 3. Характеристика направленности первой гармоники в спектре шума ДУ

Из рис. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безручко, К. В., Губин С. В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии. – Х.: ХАИ, 2007. – 310 с.
2. Борисов, М.А. Відновлювальна енергетика ХХІ // Матеріали 10-ї ювілейної міжнародної науково-практичної конференції 14–18 верес. 2009 р. – Україна. – Крим, 2009. – 300 с.
3. Гутин, Л. Я. Избранные труды. – Л.: Судостроение, 1977.–537 с.
4. Косьюк И. К., Сокол Г. И. О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя / Днепропетровский государственный университет. – Деп. ВИНТИ 1980. – 16 с.
5. Махин В. А., Присняков В. Ф., Белик Н. П. Динамика жидкостных ракетных двигателей – М.: Машиностроение, 1969. – 833 с.
6. Ребров Л. В. Отчет о результатах информационных исследований по теме: Экологическое обследование АВЭ-250 С: науч.-техн. отчет. – СВНЦ АН Украины. – Харьков: 1993. – 96 с.
7. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3 6.037-99. – Головне санітарно епідеміологічне управління. – К.: М-во охорони здоров'я України, 1999. – 79 с.
8. Сокол Г. И. Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот. – Д.: Промінь, 2000. – 136 с.
9. Сокол Г. И. Инфразвук – экологически вредный фактор в ветроэнергетике // 3б. пр. акуст. симп. «Консонанс-2005». – К.: ІГМ НАНУ, 2005. – С. 283–290.