

С. Ю. Кириченко, Г. И. Сокол

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара***МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

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.

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

Розглянуто фізичні основи генерування акустичних полів, що виникають під час роботи вітроенергетичних установок та пульсуючих повітряно-реактивних двигунів. Отримано аналітичні вирази, які дозволяють проаналізувати характеристики полів. Розроблено методики розрахунку для визначення частот, звукових тисків і характеристик спрямованості, подано аналітичний аналіз зв'язку характеристик процесу, що відбуваються у камері, і акустичного поля силових установок.

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

The physical basis for generating acoustic fields while working windmills and Pulsejet. The analytical expressions, allowing to analyze the characteristics of acoustic fields are received. The methodic of calculation for definition of frequencies, of sound pressures and of characteristics of direction are work out, the analytical analysis of the communication of the process in the performance- propulsion chamber and acoustic field are work out.

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

Введение. Необходимость использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в экономике развитых стран обусловлена не только ограниченными запасами полезных ископаемых, но и требованиями уменьшения выбросов в атмосферу парниковых газов [1; 2]. Потребление ВИЭ не сопровождается эмиссией CO₂, что позволит глобально понизить масштабы выбросов этого газа. Таким образом, использование ВИЭ в качестве первичных энергоисточников не приносит дополнительного энергетического вклада в тепловой баланс планеты. Однако при разработке ветроэнергетических установок (ВЭУ) должна решаться проблема обеспечения низких уровней интенсивности шумов и защиты окружающей среды от шумового загрязнения.

Для разработки мероприятий, направленных на снижение уровня звукового давления (УЗД) в шумах до требуемого по санитарным нормам Украины [7], необходимо провести анализ шумов от ВЭУ. В первую очередь надо определиться с источниками акустического излучения, разработать теоретические основы процесса генерирования, осуществить разработку расчетных моделей характеристик акустических полей. В таком ракурсе актуальность проблемы снижения шумов от ВЭУ не вызывает сомнений, так как необходимо исключить вредное влияние шумов на людей на прилегающих территориях и в жилых постройках, а также живых обитателей природы. Особенно важно решить проблему снижения УЗД шумов на инфразвуковых частотах [8].

В работе [6] показано, что уровень инфразвука от работающего ветроагрегата мощностью 250 кВт не превышает уровень общего шума для производственных помещений и составляет менее 80 дБ на расстоянии 400 м от ВЭУ.

Актуальность решения задачи о снижении шумов ВЭУ определяется тем, что за рубежом принят допустимый уровень шумов от ВЭУ величиной 45дБ на расстоянии 100 – 400 м от ВЭУ, а мощности вновь разрабатываемых ВЭУ и их акустического излучения возрастают.

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.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований шумов двигателей довольно широко представлены в работах [1; 2], но только для отдельных задач. В разработке [4] представлены расчеты уровня шума горения 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 [2] применен 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 исследования [1] 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 [2].

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 [7; 8]. 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 звуковых полей пульсирующих двигателей и разработка методик, позволяющих рассчитать характеристики инфразвуковых акустических полей, которые генерируются ротором ветроэлектрической установки.

Методики расчета инфразвуковых характеристик акустического поля ветроколеса. Акустическое поле, генерируемое в результате вращательного движения лопастей ветроколеса в воздушной среде. При периодическом воздействии на среду вращающихся лопастей в ней генерируется звуковое поле [6; 9]. Для описания звукового поля генератора в виде ротора применим теорию Л.Я. Гутина, описывающую звуковое поле воздушного винта. На каждый элемент колеса действуют две силы: аэродинамическая сила и сопротивление вращательному движению. Из основного закона механики следует, что этот элемент, в свою очередь, воздействует на среду с равными по величине и противоположно направленными силами. Точки приложения этих сил будем считать сосредоточенными в одной плоскости, так как осевое протяжение лопасти ничтожно мало в сравнении с длинами волн первых гармоник; назовем ее плоскостью вращения (например, протяженность лопасти ВЭУ – 250 С составляет 12 м, а длина волны первой гармоники на частоте 2, 4 Гц равна 141,6 м).

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

Силы, с которыми элемент воздействует на среду, обозначим $A(R)dR$ (параллельна оси и направлена обратно направлению оси ветроагрегата, ось колеса ветроагрегата считаем совпадающей с осью ротора, ее положительное направление от головки ветроагрегата в пространство) 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 t . Периодически повторяющиеся с периодом T силы разложим в ряд Фурье

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

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

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 обусловлен 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

$$p = \frac{m\omega_1}{2\pi c r} \left[-P \cos \vartheta + \frac{nc}{\omega_1 R_0^2} M \right] J_{mn}(kR \sin \vartheta), \quad (1)$$

здесь ϑ – угол характеристики направленности; $x/r = \cos \vartheta$ – направление косинуса радиуса-вектора; ω_m – круговая частота каждой из гармоник; r велико в сравнении с длиной волны и диаметром лопасти; ω_1 – 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 н·м; 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 300м от ветроагрегата ВЭУ – 250С 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, что на акустическое излучение тратится 0,01 % от общей мощности ВЭУ.

Постановка задачи. Моделирование акустических полей пульсирующих воздушно-реактивных двигателей. Главной составной частью ДУ является камера сгорания, в которую подаются компоненты топлива. Источником распадающейся 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 находящиеся 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 применим методику, созданную Л.Я. Гутиным для расчета характеристик звукового поля воздушного винта [3]. В своей работе 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 ученый применил представление Лэмба о том, что в случае формирования звукового поля сосредоточенная сила эквивалентна акустическому диполю. 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 летательного аппарата.

Граничные условия задачи:

$$\text{при } x=0 \text{ на окружающую воздушную среду действует сила } R(t). \quad (3)$$

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 запишем в виде

$$\begin{aligned} p_0(0, x) &= p_H, \\ V_k &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где p – звуковое давление в среде; p_H – атмосферное давление; V_k – колебательная скорость звукового процесса.

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

$$\int_0^{R_0} A(R) R dR \int_0^{2\pi} d\theta = \iint_s dp = P = \frac{G_2 W_c}{g}, \quad (5)$$

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, 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.

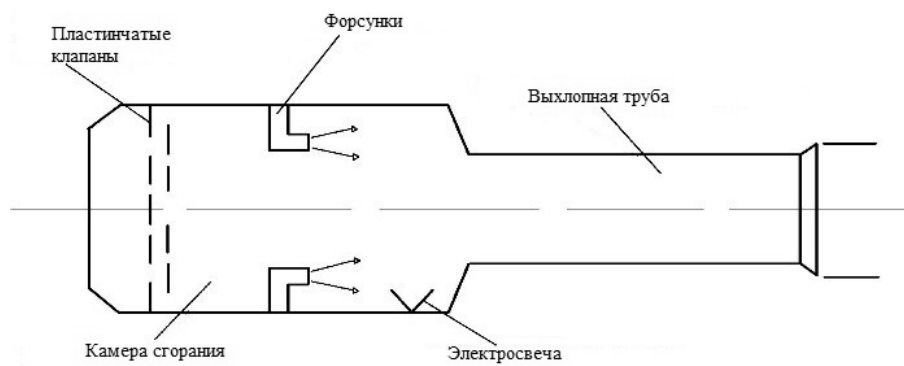


Рис. 1. Конструктивная схема ПуВРД

В отличие от прямоточных 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). 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

пониженню давления в камере сгорания, клапаны открываются вновь. Поступает новая порция воздуха, и весь цикл повторяется вновь.

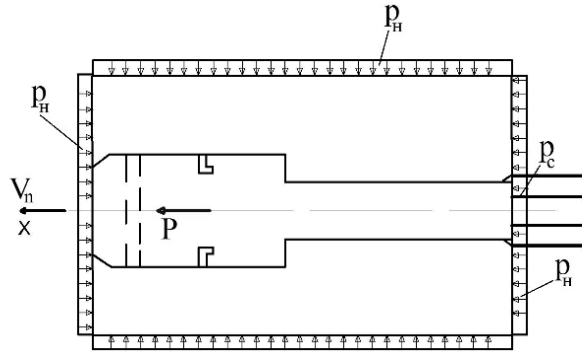


Рис. 2. Схема сил:

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

Запишем основные выражения, характеризующие работу ПуВРД, на основе известных аналитических выражений из двигателестроения [5]. Для определения силы, с которой ПуВРД воздействует на среду при своей работе, применим распространенный 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 проекций всех внешних сил на ось в i -й момент времени (Рис. 2)

$$P_x = P + F_c(p_c - p_H), \quad (6)$$

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 -го момента времени

$$P = \frac{G_2}{g} W_c - \frac{G_2}{g} V_n + F_c(p_c - p_H), \quad (7)$$

где G_2 – 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 (7) далее может не учитываться. Считаем, что сопло работает в расчетном режиме $p_c = p_H$. Тогда уравнение (7) перепишем в виде

$$P(t) = \frac{G_2(t)}{g} W_c(t). \quad (8)$$

Если опорожнение камеры сгорания двигателя происходит в надкритическом режиме, то формулу запишем в виде

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

Расход газов определим из выражения согласно [3]

$$G_2(t) = \mu_k F_{kp} p_k(t) \sqrt{\frac{k}{R_k T_k(t)} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (10)$$

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

$$p_0 \geq p_k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (11)$$

Расход газов определим из выражения

$$G_2(t) = \mu_k F_{kp} p_k(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{R_k T_k(t)} \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{p}{p_k(t)}\right)^{\frac{2}{k}} \cdot \left(\frac{p}{p_2(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

Аналитическое выражение для силы, с которой струя, истекающая из сопла ПуВРД, воздействует на среду на основе (8), имеет вид

$$|R(t)| = \left| \frac{G_2(t)}{g} \cdot W_c(t) \right|. \quad (12)$$

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 [5] и его записывают в виде

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{k-1}{V_k} (i_1 G_1 - i_2 G_2 + \frac{dQ}{dt}), \quad (13)$$

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 (13) 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 [там же].

Скорость истечения продуктов сгорания определяют из известного соотношения

$$W_c(t) = \lambda_{kp}(T_c) a_{kp}(T_{kp}), \quad (14)$$

где T_c – температура продуктов сгорания на срезе сопла; T_{kp} – температура газов в критическом сечении сопла; a_{kp} – скорость звука в критическом сечении; λ_{kp} – 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

$$|R(t)| = \begin{cases} R(t) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau \leq t \leq T \end{cases} = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{2m\pi t}{T} - \alpha_m\right) + \frac{A_0}{2}, \quad (15)$$

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; $m = 1, 2, \dots, 6$; ω_m – круговая частота.

Значение силы $R(t)$ в промежутке $\tau \leq t \leq \tau$ известно из (12). Действие на среду происходит только в промежутке времени τ и обусловлено повышением давления в камере сгорания вследствие сгорания компонентов топлива.

Определим коэффициенты ряда Фурье

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{2\tau}{T} R(t), \\ A_0 &= \frac{\tau}{T} R(t). \end{aligned} \quad (16)$$

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

$$X = -\frac{2\tau}{T} R(t) e^{-ikt} e^{-ikm}, \quad (17)$$

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

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

$$\phi = \frac{i}{4\pi\rho kc} \left(X \frac{\partial}{\partial x} + Y \frac{\partial}{\partial y} + Z \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad (18)$$

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

$$\phi = \frac{i}{4\pi\rho kc} X \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}. \quad (19)$$

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

$$p = \rho \frac{dj}{dt} = \frac{\omega_m \tau}{2\pi c T} R(t) \cos \theta \left(\frac{1}{z} \cos z + \sin z \right), \quad (20)$$

где θ – угол характеристики направленности;

$$z = kr.$$

В (20) записана только действительная часть звукового давления, так как нас интересует полезная часть излучаемой мощности. Акустическую мощность определяем на основе выражения из [3]

$$W = \int_0^n \frac{p^2}{2\rho c} 2\pi r^2 \sin \theta d\theta, \quad (21)$$

где n – число импульсов двигателя за выделенный промежуток времени.

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 [4]. Там же выполнено разложение периодической функции $p_k(t)$ в ряд Фурье и определены её гармонические составляющие. Вид пери-

одической функции звукового давления в атмосфере $p(t)$ при действии на неё вытекающих струй из высокоскоростных продуктов сгорания ПуВРД был также получен экспериментально [там же].

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

Обсуждение результатов. 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.

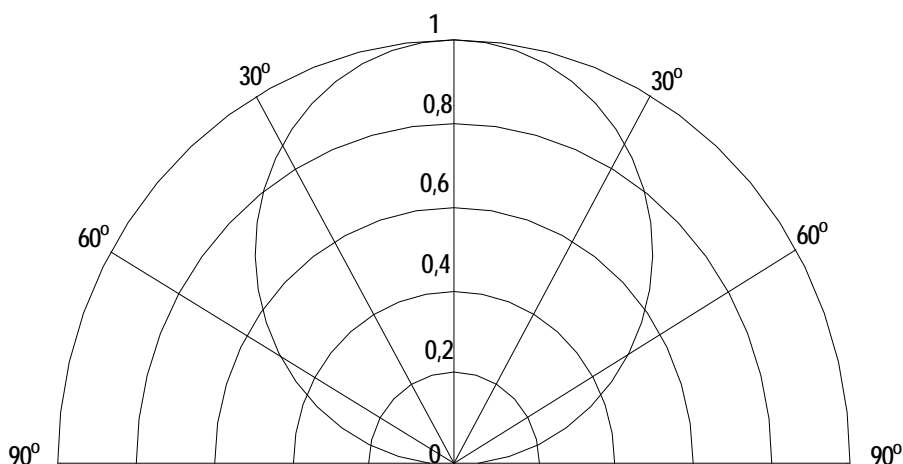


Рис. 3. Характеристика направленности первой гармоники в спектре шума ДУ

Мероприятия по снижению уровня шумов инфразвукового диапазона. В условиях эксплуатации уменьшение УЗД в источнике шума достигается заменой шумного, устаревшего оборудования, а при проектировании – выбором оборудования с лучшими шумовыми характеристиками, правильным расчетом режима его работы:

- правильная ориентация источника шума, при необходимости изменение направленности. ВЭУ следует устанавливать так, чтобы излучение шума было направлено в сторону, противоположную жилым застройкам и общественным зданиям;
- размещение ВЭУ на необходимо удаленном расстоянии от жилой застройки;
- снижение скорости ротора в ночное время.

Выводы. Выяснено, что характер общего шума ВЭУ определяется излучением звука отдельных ее узлов. Проанализирована методика расчета УЗД в дальнем поле воздушного винта на проведение расчетов характеристик акустического поля ветроколеса. Проведены расчеты УЗД первых инфразвуковых гармоник (2,4 Гц; 4,8 Гц; 9,16 Гц; 18, 32 Гц) и построены их характеристики направленности.

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 со-

став отдельных гармонических составляющих, построить их характеристику на 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 существенно зависит от пары компонентов топлива, на которых работает двигательная установка.

Разработан перечень мероприятий по снижению уровней инфразвуковых шумов, генерируемых при работе ВЭУ.

Библиографические ссылки

1. **Безручко, К. В.** Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии [Текст]: учеб. пособие / К. В. Безручко, С. В. Губин; Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т». – Х. : ХАИ, 2007. – 310 с.
2. **Борисов, М. А.** Відновлювальна енергетика ХХІ століття [Текст]: зб. пр. / М. А. Борисов // Матеріали 10-ї ювілей. міжнар. науково – практ. конф. 14 –18 верес. 2009 р. – Україна. – Крим, 2009. – 300 с.
3. **Гутин, Л. Я.** Избранные труды [Текст] / Л. Я. Гутин. – Л.: Судостроение, 1977. – 537 с.
4. **Косько, И. К.** О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя [Текст] / И. К. Косько, Г. И. Сокол; Днепропетр. гос. ун-т. – Деп. ВИНТИ, 1980. – 16 с.
5. **Махин, Л. В.** Динамика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / В. А. Махин, В. Ф. Присняков, Н. П. Белик; под ред. В. А. Махина. – М.: Машиностроение, 1969. – 833 с.
6. **Ребров, Л. В.** Отчет о результатах информационных исследований по теме: экологическое обследование АВЭ-250 С [Текст]: науч.-техн. отчет / Л. В. Ребров; СВНЦ Акад. наук Украины. – Х., 1993. – 96 с.
7. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3 6. 037 – 99 [Текст] / 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 [Текст]: науч. монография / Г. И. Сокол. – Д.: Промінь, 2000. – 136 с.
9. **Сокол, Г. И.** Инфразвук – экологически вредный фактор в ветроэнергетике [Текст]: сб. тр. / Г. И. Сокол // Междунар. акуст. симп. «Консонанс – 2005» К., 27 – 29 сент., 2005. – К., 2005. – С. 283 – 290.

Надійшла до редколегії 08.10.2015

УДК 621.315.592.3

В. З. Куцова, О. А. Носко, А. М. Сулай

Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ ПІД ДІЄЮ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Проаналізовано вплив слабого постійного магнітного поля на структуру та властивості кремнію: виявлено підвищення мікротвердості, деградацію електрофізичних властивостей і формування полікристалічної структури в зразках кремнію. Детально пояснено магнітостимульовані явища в досліджуваних зразках.

Ключові слова: монокристалічний кремній, мікроструктура, мікротвердість, електрофізичні властивості, магнітостимульовані ефекти.

© В. З. Куцова, О. А. Носко, А. М. Сулай, 2015