

ИМПУЛЬСНЫЕ ФУНКЦИИ В АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г.И. Сокол, канд.техн.наук, доцент, У.Н. Тучина

Днепропетровский национальный университет

Рассмотрено использование импульсных функций в акустических процессах. Это воздействие на среду периодической последовательностью пилообразных ударных волн, периодические возмущения среды во время работы пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, воздействие периодических ударных волн на расплавы при выплавке металлов.

Эффективность многих технологических процессов повышается за счет воздействия на рабочие тела периодическими ударными волнами, переходящими в акустические колебания. Специально разработанные генераторы ударных волн и излучатели шума импульсного типа могут быть использованы для отчистки котлов тепловых электростанций, для интенсификации процесса выплавки металлов в металлургических агрегатах [1].

Необходимость исследования спектрального состава единичных и периодических ударных волн обусловлена вредным физическим и психологическим действием на людей, строения и почву. В [2] описано воздействие ударной волны во время сверхзвукового полета на поверхность земли при полете самолета. Зарождается волна сложной «N» формы. На большом расстоянии волна «N» начинает, в свою очередь, видоизменяться в результате более быстрого поглощения составляющих с низкой спектральной плотностью, она «округляется», и, в конечном итоге, здесь остаются акустические инфразвуковые волны.

В связи с этим остро стоит проблема расчета амплитуд спектральных составляющих ударных волн, а также выявление связи между амплитудой этих составляющих и энергетическими параметрами генераторов. Характерным показателем здесь является избыточное давление. В частности, при работе нестационарных излучателей на топливных смесях необходимо выявить связь между амплитудой звукового давления в дальнем поле излучателя и параметрами процесса горения и истечения.

Целью настоящей работы является выявление связи между амплитудой спектральных составляющих периодических ударных волн и энергетическими параметрами их генераторов, путем составления физической и математической моделей процессов.

Энергетическая спектральная плотность звукового удара (или N - образной ударной волны) представлена в работах [2]. Воздействие звукового удара зависит от высоты полета, массы (подъемной силы), формы самолета и числа Маха. Наиболее точное представление о звуковом ударе дает его энергетический спектр. Пример такого спектра N - образной ударной волны с конечным временем нарастания приведен в работе [3]. В соответствии с этим рисунком частотная характеристика звукового давления акустических волн достигает максимума на относительно низкой частоте 1,5 Гц.

Теоретически периодическая ударная «N» волна описывается импульсной функцией времени:

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{\Delta P}{T}t & \text{для } -T < t < T, \\ 0 & \text{для } t < -T \text{ и } t > T \end{cases},$$

где ΔP - избыточное давление, T – период следования ударных волн, t – время.

Для искусственного получения периодической ударной «N» волны необходимо уточнить её характеристики.

Спектр отдельного импульса задается через:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega \cdot t} dt.$$

Если повторять этот импульс с интервалами T , то получим периодическое явление, амплитуда которого определяется как:

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot nt / T} dt.$$

где n - частота следования ударных волн, ω - круговая частота. Спектр пилообразных колебаний представлен на рисунке 1.

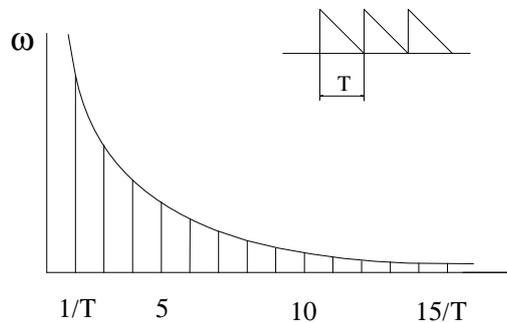


Рис. 1. Спектр пилообразных колебаний.

Если повторять этот импульс все более и более реже, дискретные составляющие, относящиеся к периодическому спектру, будут появляться с большей частотой и смешиваться со сплошным спектром при периоде $T \rightarrow \infty$, т.е. со спектром одного сигнала.

При этом спектр пилообразной волны или периодической последовательности импульсов в форме «N» определяется рядом Фурье:

$$y = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega \cdot t + \frac{1}{2} \sin 2\omega \cdot t + \frac{1}{3} \sin 3\omega \cdot t \dots \right).$$

Периодическая сила, генерирующая акустическое поле в атмосфере, определяется из выражения

$$R(t) = \Delta p(t) \cdot S,$$

где S – площадь окна, через которое распространяются периодические ударные волны в атмосферу, $\Delta p(t)$ – определяем из формулы (1).

Рассмотрим периодические возмущения среды, вызываемые работой пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПУВРД). ПУВРД воздействует на среду циклически следующими потоками газов сгоревших компонентов топлива. Возмущения в среде на срезе сопла двигателя распространяются в области атмосферы, ранее волнами не затронутые. Частотная характеристика звукового поля обусловлена частотой следования отдельных потоков газа в секунду, а значит, частотой пульсации давления в камере сгорания двигателя. Акустическая мощность такого поля определяется энергетическими качествами двигателя.

Главной составной частью ПУВРД является камера сгорания, в которую подаются воздух и горючее. Источником располагаемой энергии ПУВРД является химическое превращение компонентов топлива в продукты сгорания, истечение которых через сопло вызывает силу тяги.

Аналитическое выражение для силы, с которой ПУВРД воздействует на среду при своей работе, получено в [3].

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

где $G(t)$ – секундный расход газов от времени t , $W_c(t)$ – скорость газов, g – ускорение свободного падения.

Изменение давления в камере сгорания по времени можно описать следующей периодической импульсной функцией:

$$P_k(t) = \begin{cases} P'_k & \text{для } 0 \leq t \leq \tau \\ P_n & \text{для } \tau \leq t \leq T \end{cases},$$

где P_n – давление в камере сгорания до начала процесса горения, $P'_k(t)$ – функция давления газов в камере сгорания, описывающая повышение давления вследствие сгорания топливной смеси и падение его вследствие истечения газов из камеры сгорания в окружающую среду, τ – время, в течение которого давление в камере сгорания изменяется по функции $P'_k(t)$, T – период процесса, т.е. время между повышениями давления в камере сгорания.

Уравнение динамики камеры сгорания ПУВРД для работы на месте записывается

$$\frac{dP_k}{d\tau} = \frac{k-1}{V_k} \left(i_1 G_1 - i_2 G_2 + \frac{dQ}{d\tau} \right),$$

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.

Видно, что расход продуктов сгорания зависит от рода топлива, коэффициента соотношения компонентов топлива, их расхода и объема камеры сгорания. Этим определяется воздействие на окружающую среду силой $R(t)$.

Для определения величины спектральных составляющих акустических волн в спектре шума ПУВРД необходимо, прежде всего, иметь вид периодической функции импульсов звукового давления и знать частоту их следования. Вид периодической функции звукового давления в атмосфере при действии на неё вытекающих струй из высокоскоростных продуктов сгорания был получен экспериментально. В работе [4] разложение периодической функции в ряд Фурье и определены её гармонические составляющие.

Потенциал скоростей акустического поля, обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X, Y, Z есть [4]

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

где ρ - плотность среды, c - скорость звука, k - волновое число, r - расстояние. Звуковое давление определяется как:

$$p = \left| \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right| = \frac{\omega_m \tau}{2\pi c T} R(t) \cos \vartheta \left(\frac{1}{kr} \cos kr + \sin kr \right),$$

здесь m - номер гармоники, ω - круговая частота, ϑ - угол характеристики направленности.

Характеристика направленности излучателя периодических ударных волн представлена на рис. 2.

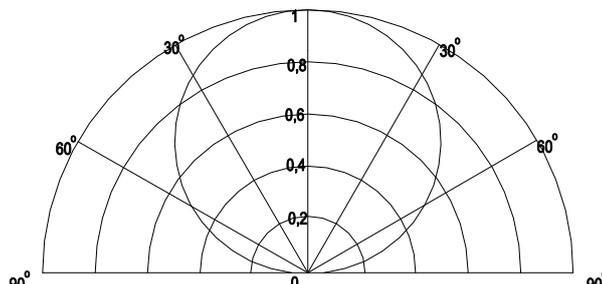


Рис. 2. Характеристика направленности излучателя периодических ударных волн.

Рассмотрим процесс продувки ванны металла в конвертере кислородом, управляющим фактором, которого является струя кислорода. Известно, что пограничный слой вокруг обтекаемого газом тела оказывает наименьшее сопротивление массопереносу в случае турбулентного газового потока, поэтому для интенсификации процесса применяют турбулентные и пульсирующие потоки. Причем, скорость процесса обезуглероживания растет с увеличением частоты пульсаций [6]. В [5] разработан способ продувки ванны металла с использованием периодических ударных волн. Пульсации частотой 80 Гц ускорили обезуглероживание на 40-50 %.

Эксперименты показали, что для интенсивного перемешивания расплава в конвертере нужны колебания полного давления в струях со сравнительно невысокой частотой и с большой амплитудой [7].

Для описания теоретической модели воздействия периодических ударных волн на поверхность расплава вводится периодическая функция избыточного давления $p(t)$ кислорода в зависимости от времени, которая представлена двумя составляющими: периодом

следования ударных волн T и промежутком времени « τ », когда ударная волна действует на расплав.

$$p(t) = \begin{cases} p_M & \text{для } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{для } \tau \leq t \leq T \end{cases},$$

где p_M - амплитуда в ударной волне.

Можно принять, что давление струи, действующей на поверхность ванны i_{cp} , равно избыточному давлению в ударной волне p_M в месте встречи ударной волны с поверхностью расплавленного металла. Далее в расплаве распространяется акустическая волна, звуковое давление в которой $p_{ак} < p_M$, так как при встрече ударной волны с поверхностью расплава имеют место поглощение и отражение энергии волны.

$$p_{ак} = \rho c M^2$$

где ρ - плотность среды жидкого металла, c - скорость звука в среде жидкого металла, M - число Маха.

$$M = V/c$$

где V - колебательная скорость.

Для ударных волн число Маха $M=1,2,\dots$ и так далее. Поэтому воздействие на жидкий металл периодическими ударными волнами в « M » раз больше, чем при простом пульсирующем дутье. В итоге имеем для величины усвоения расплавом кислорода

$$G = 27,5lg p_{ак} k = 27,5lg \rho c M^2 k,$$

здесь k - коэффициент потерь при переходе волны в среду жидкого металла $k < 1$.

Эта зависимость дает возможность представить преимущество воздействия на расплав периодическими ударными волнами по сравнению с другими видами воздействий. Здесь получена прямо пропорциональная связь между степенью усвоения кислорода G и избыточным давлением в ударной волне p_M . Если к тому же частоту следования ударных волн задать равной резонансной частоте ванны жидкого металла, то акустическое давление значительно возрастет. Строго говоря, частота следования ударных волн, равная резонансной частоте ванны жидкого металла, может не привести сразу к желаемому явлению увеличения амплитуды колебаний, так как форма ударной волны такова, что предполагает разложение её на спектральные составляющие. В этом случае интенсивность перемешивания может быть максимальна при совпадении резонансной частоты ванны с частотой одной из гармонических составляющих ударной волны. На рис.3 представлен вид функции периодической ударной волны. На рис.4 изображены гармонические составляющие функции, представленной на рис.3. Величина амплитуд и частот спектральных составляющих получена по известным методикам спектрального разложения функции в ряд Фурье.

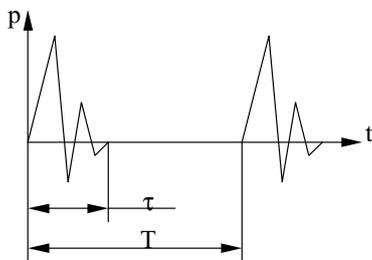


Рис. 3. Вид функции $p_M(t)$

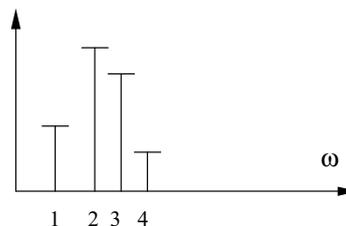


Рис. 4. Спектр функции

В [8] розроблена принципіальна схема акустическої фурми, (представлена на рис. 5) призначеної для організації процесу подачі кисню з генеруєми в потоці періодическими ударними хвилями. Акустическа фурма содержит сопло Лавалю, установленне в каналі. В кожеский канал періодически вводитеся клиновидне тєло с помощью електромеханіческого вібратора. Сопло Лавалю с каналом об'єднено водоохладжуєми корпусом. Поток кисню рухаетеся через сопло Лавалю со сверхзвуковою шкоростю в каналі. Клиновидне тєло вводитеся в сверхзвуковий потік, що і формует ударні хвилі с большою амплітудою колекбаній.

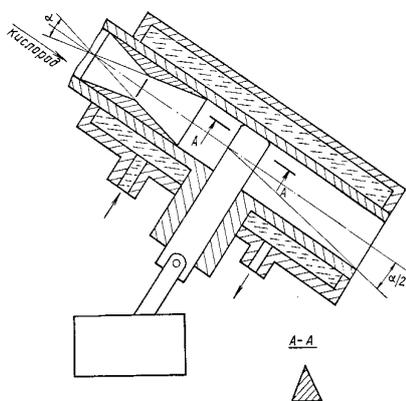


Рис. 5. Принципіальна схема акустическої фурми

ЛИТЕРАТУРА

1. Сокол Г.И. Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот. – Днепропетровск: Промінь. - 2000. – 136 с.
2. Pironov L.: Les-infrasons. – PARIS: CNRS - 1976. – 277р.
3. Справочник по технической акустике/Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. – Л.: Судостроение. – 1980.
4. Косько И.К., Сокол Г. И. О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. // Деп. ВИНТИ № 4326 –80 от 10.10.1980. - 1990. - 16с.
5. G. Sokol U. Tuchina. About the one Technology in the Smelting // 8-th International BALTIC CONFERENCE “Materials Engineering – 99” September 23-24. – 1999.-P. 51-52.
6. Косько И.К., Сокол Г.И. и др. Акустическая фурма для продувки металла в конвертере. А.С. № 1195653, СССР. - 1986.
7. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конверторного процесса.-М.: Металлургия. - 1975.-176с.
8. Явойский В.И. Применение пульсирующего дутья при производстве стали.-М.: Металлургия. - 1985.-176с.