

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_58e6133828b832.29820023

Горлов А.С., канд. техн. наук, доц.,
Савотченко С.Е., д-р физ.-мат. наук, проф.,
Петрашев В.И., ст. препод.,
Горлов К.А., магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЙ ПОТОК В ВИХРЕ-АКУСТИЧЕСКОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

belgoras@mail.ru

Рассмотрена математическая модель механизма акустического воздействия на ограниченные газовые потоки в коротких вихревых камерах. Для управления аэродинамическими, турбулентными параметрами течений воздуха в вихревых камерах вихре-акустических диспергаторов используются цилиндрические резонаторы. Получены распределения давления в камере вихре-акустического диспергатора и в самих резонаторах.

Ключевые слова: короткие вихревые камеры, цилиндрические резонаторы.

Введение. Механизм акустического воздействия на ограниченные газовые потоки в настоящее время еще до конца не изучен [1, 6, 10]. Ясно, что он обусловлен взаимодействием акустических возмущений с когерентными структурами потока энергоносителя в ограниченных объемах различных устройств, например в вихревых камерах и вихре-акустических диспергаторах [2, 3, 7, 9]. Для управления аэродинамическими, турбулентными параметрами течений в коротких вихревых камерах вихре-акустических диспергаторов можно использовать цилиндрические резонаторы [4, 5]. Формирование широкого спектра акустического излучения при помощи цилиндрических резонаторов и резонаторов Гельмгольца используются в аэродинамике. Это позволяет решать разнообразные технологические задачи, в том числе в технологических процессах, происходящих в камере измельчения вихре – акустического диспергатора [7, 8].

Для изучения и визуализации процессов, проходящих в окрестности резонаторов в короткой вихре-акустической камере, проводились эксперименты на лабораторных установках рис.1. Резонаторы в виде цилиндров располагались в верхней крышке вихревой камеры [7]. Для визуализации процессов в вихревую камеру загружали мелкодисперсный материал и отслеживали характер его движения в самой камере, в окрестности резонаторов и в самих резонаторах.

Рассмотрим физическую модель процессов, происходящих при обтекании газовым потоком системы цилиндрических резонаторов.

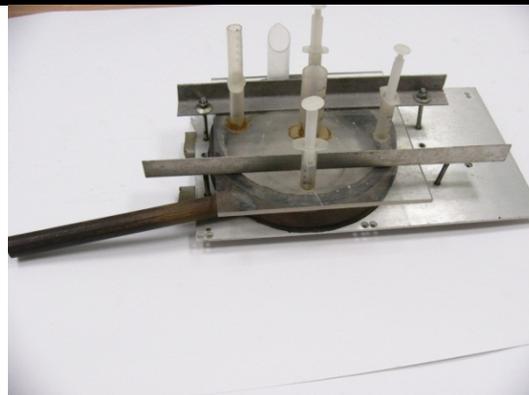


Рис. 1. Лабораторная установка короткой вихревой камеры с вертикальными цилиндрическими Резонаторами

Поступление массы газа в цилиндрический резонатор вызывает в нем возвратное течение по отношению к основному потоку энергоносителя. Возвратный поток в резонаторе, двигаясь вдоль дна, натекает на переднюю стенку и по мере нарастания его интенсивности создает на ней наибольшее давление. Затем возвратный поток частично отражается от передней стенки и частично вытекает из резонатора. Это изменяет структуру основного потока энергоносителя в окрестности резонаторов. Выходящий газ из резонатора смешивается с основным потоком. Скорость у него меньше чем скорость основного потока, поэтому будет происходить торможение основного потока. При перемещении газовой среды, заполняющей резонаторную полость, в одну или другую сторону среда в резонаторе испытывает сжатия или разрежение, и давление в нем изменяется. На открытом же конце резонатора давление все время остается неизменным

(таким как в основном потоке энергоносителя в вихревой камере). Схема движения воздуха внутри цилиндрического резонатора представлена на рис. 2.

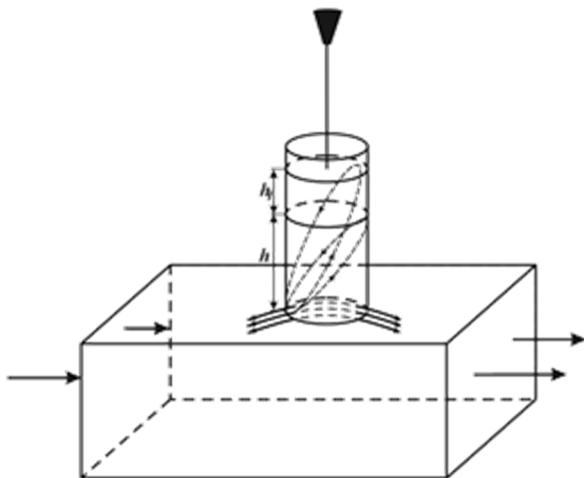


Рис. 2. Схема движения воздуха при обтекании цилиндрического резонатора

Изменение давления в цилиндрическом резонаторе описывается уравнением, которое имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{c^2 S}{hV} (p - p_o), \quad (1)$$

где c – скорость звука, S – площадь поперечного сечения входного канала, h – эффективная длина резонатора, V – объем резонатора, p – давление энергоносителя (воздуха) в канале, p_o – давление энергоносителя (воздуха) в резонаторе.

При этом собственная частота ω будет равна:

$$\omega = c \sqrt{\frac{S}{hV}}, \quad (2)$$

Если x – смещение массы m газа, заключенного в цилиндрическом резонаторе, тогда уравнение для колебаний среды в цилиндрическом резонаторе примет вид [3]:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\varepsilon \frac{\partial x}{\partial t} + \omega^2 x = \frac{S \Delta p}{m} \quad (3)$$

где Δp – переменное возмущающее давление, действующее со стороны основного потока энергоносителя в вихревой камеры в устье резонатора, ε – коэффициент затухания резонатора. Возмущение давления представляет собой гармоническое колебание

$$\Delta p = A \cos \omega t, \quad (4)$$

которое является решением уравнения (1).

Звуковое давление внутри резонатора может быть представлено в виде:

$$p_o = \rho_o c^2 + \rho \frac{k-1}{2} c^2, \quad \rho = \rho_o \frac{S}{V}. \quad (5)$$

Здесь ρ_o – плотность газа, ρ – возмущения плотности газа, k – показатель адиабаты.

Рассмотрим плоскую стоячую звуковую волну, распространяющуюся от первого резонатора. Все величины в этой волне являются функцией только от одной координаты и от времени. Написав общее решение уравнения [3],

$$\frac{d^2 \varphi_0}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \varphi_0 = 0 \quad (6)$$

в виде $\varphi_0 = B \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c} x + \beta\right)$, будем иметь:

$$\varphi = B \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cos\left(\frac{\omega}{c} x + \beta\right), \quad (7)$$

где φ – потенциал скорости.

При определенном выборе начала координат и начала отсчета времени можно обратить α и β в нуль, так что будет

$$\varphi = B \cos \omega t \cdot \cos \frac{\omega}{c} x. \quad (8)$$

Для скорости и давления в волне имеем:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -B \frac{\omega}{c} \cos \omega t \sin \frac{\omega}{c} x; \quad (9)$$

$$p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \rho \omega \sin \omega t \cos \frac{\omega}{c} x. \quad (10)$$

Соотношение $\omega = ck$ между частотой и волновым вектором имеет место для звуковой волны, распространяющейся в неподвижной среде. Нетрудно получить аналогичное соотношение для волны, распространяющейся в движущейся среде. Так как основной поток в вихревой камере движется со средней скоростью u , то частота звука будет равна $\omega = ck - u\bar{k}$.

Вводя угол Θ между направлением скорости u и волнового вектора \bar{k} и полагая $k = \omega_0 / c$, найдем, что частота звука равна

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{u}{c} \cos \Theta\right), \quad (11)$$

Плотность звуковой энергии в движущейся среде [1]

$$E = E_0 \frac{\omega}{\omega - \bar{k}u}, \quad (12)$$

где $E_0 = c^2 \rho^{12} / \rho$ – плотность энергии в системе отсчета, движущейся вместе со средой.

Если при обтекании резонаторных полостей имеется обратная связь между колебаниями в резонаторе и интенсивностью пульсаций давления в устье резонатора в интервале собственных частот ω , а также механизм ограничения роста интенсивности пульсаций, то система резонатор - внешний поток будет автоколебательной. Параметры автоколебаний в основном потоке при обтекании резонаторных полостей за-

висят от геометрических размеров резонаторов и от удаления их друг от друга в эквивалентном канале. Резонаторы могут иметь разные значения геометрические размеры и в результате каждый резонатор будет иметь свою собственную частоту и свой спектр излучения.

Численное и компьютерное моделирование помогает понять процессы, проходящие в коротких вихревых камерах с резонаторами в верхней крышке. Результат компьютерного моделирования представлен на рис.4.

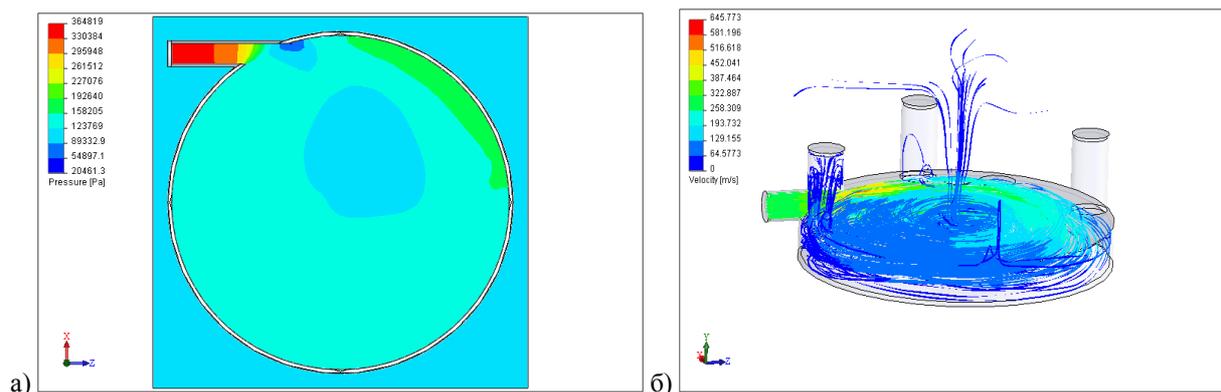


Рис. 4 Течение энергоносителя в вихревой камере с цилиндрическими резонаторами:

а) распределение давления в плоскости камеры; б) распределение скорости воздуха в объеме камеры

Результаты проведенных экспериментов и численных расчетов показывают, что в цилиндрических резонаторах существуют колебания, которые в объемах вихревой камеры создается комплекс возмущающих воздействий на поле течения энергоносителя.

При высокочастотном возбуждении уменьшаются коэффициенты корреляции пульсаций скорости в основном газовом потоке вихревой камеры. Это ведет к ослаблению когерентных структур, уменьшается интенсивность перемешивания, это наблюдается на лабораторной установке вихревой камеры при подачи в нее мелкодисперсного материала. Низкочастотное акустическое взаимодействие на поток энергоносителя в короткой вихревой камере приводит к увеличению максимальных коэффициентов корреляции пульсаций скорости энергоносителя. Это свидетельствует об интенсификации и повышении устойчивости крупномасштабных структур, ответственных за турбулентное перемешивание, например, двухфазной среды в вихревой камере измельчения вихре-акустического диспергатора.

Таким образом, с помощью системы цилиндрических резонаторов можно управлять процессами движения газового потока различной конфигурации, значением аэродинамических характеристик в коротких вихревых камерах при организации технологических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л.Д., Лифшиц М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
2. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 365 с.
3. Шугаев Ф.В. Взаимодействие ударных волн с возмущениями. Изд. МГУ, 1983. 96 с.
4. Кравчун П.Н. Генерация и методы снижения шума и звуковой вибрации.
5. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 520 с.
6. Лебедев М.Г., Теленин Г.Ф. Частотные характеристики сверхзвуковых струй. Изд. МГУ Москва, 1978. 118 с.
7. Горлов А.С. Вихре-акустический диспергатор комплексного воздействия на частицы измельчаемого материала: дис. ... канд. техн. наук. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006.
8. Горлов А.С., Губарев А.В., Горлов К.А. Математическое и имитационное моделирование вихревого потока в коротких вихревых камерах// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №9. С.137–142
9. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М., Машиностроение, 1969. 183 с.
10. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л., Гидрометеиздат, 1975. 304 с.

Gorlov A.S., Savotchenko S.E., Petrashev V.I., Gorlov K.A.
**MATHEMATICAL MODELING OF ACOUSTIC IMPACT ON GAS FLOW
IN VORTEX-ACOUSTIC DISPERSANT**

Mathematical model of mechanism of acoustic impact on limited gas flows in short swirl chambers is considered. Cylindrical resonators are used to control the aerodynamic, turbulent parameters of air currents in swirl chambers of vortex-acoustic dispersants. The distributions of pressure in chamber of vortex-acoustic dispersant and in resonators are obtained.

Key words: *short swirl chambers, cylindrical resonators.*

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: belgoras@mail.ru

Савотченко Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Петрашев Владимир Иванович, старший преподаватель, кафедры высшей математики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Горлов Кирилл Александрович, магистрант
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.