

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

#### Библиографический список

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987. Ч.1. 464 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Дрофа, 2003. 784 с.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М.: Наука, 1983. Т.1. 528 с.
4. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. - СПб: Недра, 2003. 284 с.
5. Шокин Ю.И., Яненко Н.Н. Метод дифференциального приближения, применение к

газовой динамике. - Новосибирск: Наука, 1985. 364 с.

6. Стернин, Л.Е. Двухфазные моно – и полидисперсные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1980. 176 с.

7. Fletcher C.A., Computation Techniques for Fluid Dynamics. Springer–Verlang: Berlin et al., 1988. 502 p.

8. MacCormak R.W., Lomax H. Numerical solution of compressible viscous flows // Ann Rev. Fluid Mech. 1979. No. 11. P. 289-316.

9. Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. - Новосибирск: Наука, 1990. 247 с.

УДК 534.283:519.6:534.222.1

### ГЕНЕРАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДИСПЕРСНОСТИ ГАЗОВЗВЕСИ

©2016 Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог

Казанский национальный исследовательский технический университет  
имени А.Н. Туполева - КАИ

#### PARAMETRIC RESONANCE GENERATION IN ACOUSTIC RESONATOR UNDER CHANGING OF GAS-SUSPENSION DISPERSION

Tukmakova N.A., Tonkonog V.G. (Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation)

*The coagulating gas-suspension resonance oscillations occurrence in the acoustic resonator at the fixed external influence frequency and amplitude near bearing medium first fundamental frequency is numerically simulated. Change of system oscillation nature with its dispersion variation is shown.*

Существуют технические устройства, в которых изменение свойств рабочей среды в результате внешнего воздействия может сопровождаться возникновением акустического параметрического резонанса [1]. Характеристики механических колебаний в таких системах зависят от скорости потока рабочей смеси, её дисперсности и температуры. В данной работе численно моделируется возникновение резонансных колебаний коагулирующей газовзвеси в акустическом резонаторе при фиксированной частоте и амплитуде внешнего воздействия в окрестности первой собственной частоты несущей среды. Динамика газовзвеси описывается системой уравнений движения многоскоростного мно-

готемпературного континуума с учётом обмена импульсом и энергией между несущей средой и фракциями дисперсной фазы.

Для описания коагуляции частиц различных фракций применяется лагранжева модель Смолуховского, учитывающая парные столкновения и позволяющая учесть обмен массой, импульсом и энергией между фракциями в результате соударения частиц [2]. В работе были рассмотрены два случая – когда частицы разных фаз коагулируют и не коагулируют при каждом столкновении. В качестве акустического резонатора рассматривался плоский прямоугольный канал, один из концов которого представлял собой твёрдую стенку, а в другом находился поршень,

колеблющийся по гармоническому закону. В начальный момент резонатор равномерно заполнен несущей средой с частицами разных фракций.

Из литературы известно, что если рабочая среда содержит мелкодисперсную фракцию [3-4], то вследствие её малого скоростного скольжения относительно несущей фазы, такие частицы полностью вовлекаются в движение и оказывают существенное диссипативное влияние на колебания системы в отличие от частиц крупной фракции.

Частота колебаний поршня фиксирована ( $f = 137$  Гц) и совпадает с первой собственной частотой продольных колебаний несущей среды (газообразный метан), заполняющей канал. Несущая фаза описывается системой уравнений Навье-Стокса, в которой учитывается обмен импульсом и энергией с дисперсной фазой.

Система уравнений движения двухфазной полидисперсной смеси записывалась в обобщенных подвижных координатах и решалась явным методом Мак-Кормака второго порядка со схемой нелинейной коррекции [5-6].

В качестве термического уравнения состояния для несущей среды было применено уравнение состояния Бенедикта-Вебба-Рубина [7]:

$$p = RT\rho + \left( B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \rho^2 - (bRT - a) \rho^3 + \alpha \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2),$$

где коэффициенты  $a$ ,  $A_0$ ,  $b$ ,  $B_0$ ,  $c$ ,  $C_0$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  определяются в зависимости от плотности, давления и температуры метана в парообразном состоянии.

Крупнодисперсная фракция нужна в численном эксперименте для запуска процесса коагуляции в нелинейном волновом поле. На стенках канала для скорости несущей фазы и дисперсных фракций ставятся условия прилипания. Для всех остальных газодинамических функций, в том числе на входной и выходной границах задаются однородные граничные условия второго рода.

Пусть смесь в процессе колебаний не коагулирует. В этом случае частота первого линейного резонанса паро-капельной системы ниже, чем частота первого линейного резонанса несущей среды и составляет 105 Гц.

Рассмотрим другой случай, когда процесс колебаний смеси сопровождается коагуляцией частиц различных фракций при каждом их парном соударении. Расчёты показывают, что с течением времени, вследствие коагуляции, снижается средняя плотность мелкой фракции с радиусом частиц  $R=1$  мкм и возрастает средняя плотность частиц крупной фракции с начальным радиусом  $R=100$  мкм.

Изменение дисперсности системы приводит к снижению диссипативности и меняет характер колебаний. В результате роста частиц крупнодисперсной фракции и практически полного исчезновения частиц мелкой фракции в системе, резонансная частота системы становится близкой к первой собственной частоте продольных колебаний несущей среды. Это приводит к возникновению резонансных акустических колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы”, соглашение №14.577.21.0151 от 28.11.2014. Идентификатор проекта RFMEFI57714X0151.

#### Библиографический список

1. Григорьян Ф.Е., Перцовский Е.А. Расчёт и проектирование глушителей шума энергоустановок. - М.: Энергия. 1980. 120 с.
2. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в пяти томах. Т.1. Методы расчёта. - М.: Производственно-издательский комбинат ВИНТИ, 1971. 267 с.
3. Tukmakov A.L., Tonkonog V.G., Arslanova S.N. Effect of the Coagulation Rate on the settling Time of stationary Vibrations of Aerosol in an Acoustic Resonator // Physics of Wave Phenomena. 2015. Vol. 23. No. 3. P. 235-240.
4. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дисперсных включений. Итоги науки и техники. Серия Комплексные и специальные разделы механики. Т.3. М.: Производственно-издательский комбинат ВИНТИ. 1988. С.3-80.

5. Тукмаков А.Л., Тонконог В.Г., Арсланова С.Н. Волновая коагуляция полидисперсной газовзвеси в технологии газификации и криостатирования сжиженного природного газа. // Акустический журнал. 2016. Т.62. №1. С. 125-131.

6. Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Численное исследование эволюции ударной

волны в газовзвеси с учётом неравномерного распределения частиц // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 10. С. 109-119.

7. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия. Ленинградское отделение. 1982. 496 с.

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

©2016 В.Ф. Павлов, В.К. Шадрин, А.С. Букатый, В.Э. Костичев, С.А. Михалкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### THE ESTIMATION OF THE SURFACE HARDENING INFLUENCE ON THE PARTS MULTI CYCLIC FATIGUE

Pavlov V.F., Shadrin V.K., Bukatyi A.S., Kostichev V.E., Mihalkina S.A. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*It's been established that the average integral residual stresses through the surface layer thickness that equal the critical depth of the non-propagating fatigue crack criterion is most acceptable for the estimation of the surface hardening influence on the endurance limit.*

После упрочнения в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на многоцикловую усталость деталей используются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  упрочнённой детали в этом случае имеет вид

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot |\sigma_z^{nos}|, \quad (1)$$

где  $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\sigma_z^{nos}$ ,  $\sigma_z^{nos}$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали.

На практике при упрочнении деталей часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений,

то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими, однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Поэтому критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

Для определения второго критерия в работе [1] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [2], был получен второй критерий  $\bar{\sigma}_{ocm}$  – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений – влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$