

**Расширенное уравнение Матье и перенос энергии в пылевой плазме.**В.П. Семенов<sup>1,2</sup>, А.В. Тимофеев<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»<sup>2</sup>Объединённый институт высоких температур РАН<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Перенос энергии между степенями свободы с плазменно-пылевой системе представляет большой интерес при исследовании физики пылевой плазмы. Один из механизмов такого переноса энергии основан на явлении параметрического резонанса и его начальные стадии могут быть описаны расширенным уравнением Матье [1]:

$$\ddot{x} + 2\lambda\dot{x} + \omega_0^2(1 + h \cos(\omega_p t))x = \eta(t). \quad (1)$$

Аналитический подход к решению уравнения (1) при  $\lambda \ll 1$ ,  $h \ll 1$  и  $\varepsilon = \omega_p - 2\omega_0/n \ll \omega_0$  основан на подходе, продемонстрированном в [2] и позволяет получать решения различных порядков точности. При этом области резонанса наблюдаются вблизи отношения частот  $\omega_0/\omega_p = n/2$ . Результаты, полученные аналитически, хорошо согласуются с результатами моделирования при малых  $h$ ,  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , но не позволяют описывать области резонанса при росте параметров.

Путем численного решения уравнения (1) получены области резонанса, значения показателя роста амплитуды и времена наступления резонанса для широкого диапазона параметров, соответствующего стандартному лабораторному эксперименту. При  $h > 2$  наблюдается заметное сближение областей резонанса (рис. 1).

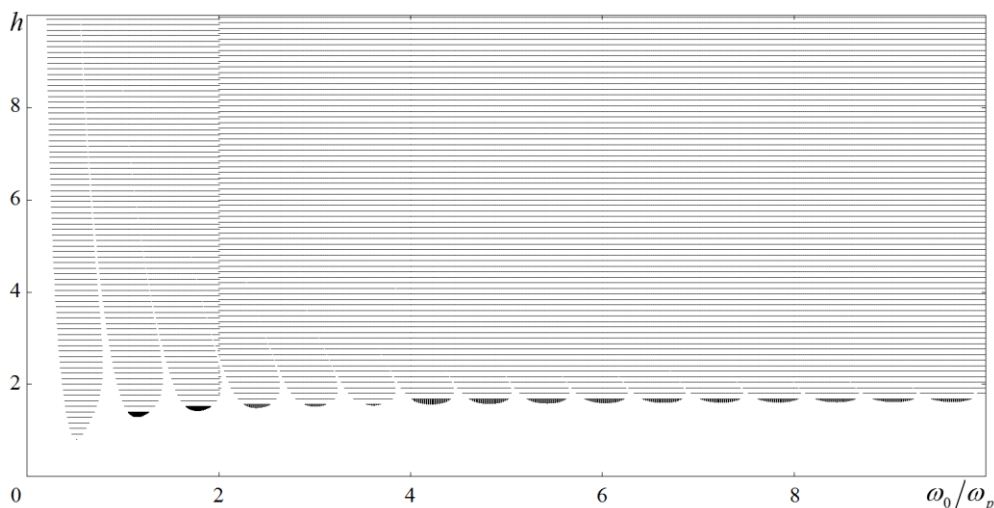


Рис. 1. Области резонанса в расширенном уравнении Матье при  $\omega_0 = 50$  и  $\lambda = 10$ . При  $h > 2$  резонанс наблюдается практически для всех значений  $\omega_0/\omega_p > 0.35$

Такой вид областей резонанса показывает, что при достаточно большом значении  $h$  резонанс возникает при практически любом соотношении частот  $\omega_0/\omega_p > 0.35$ , а не только близких к  $n/2$ . В лабораторных плазменно-пылевых экспериментах наблюдаются широкие спектры колебаний частиц [3,4]. Описанный выше результат показывает, что большая часть наблюдаемого спектра может участвовать в переносе энергии между степенями свободы. Это позволяет описать ряд экспериментальных данных [4], а также дополнить и усовершенствовать механизм переноса энергии в пылевой плазме.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 14-19-01295).

#### Литература

1. *Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В.* Аномальная кинетическая энергия системы пылевых частиц в плазме газового разряда. — ЖЭТФ — 2011 — Т. 140. — № 5. — С. 1017-1032.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: учебное пособие — в 10-ти т. Т. I Механика. — 4-е изд. // М.: Наука — 1988.
3. *Vasilyak L.M., Fortov V.E., Morfill G.E., and et al.* — Increase of kinetic energy of dusty cluster particles. — Contrib. Plasma Phys. — 2010.
4. *Ichiki R., Ivanov Y., Wolter M., Kawai Y. and Melzer A.* — Melting and heating of two-dimensional Coulomb clusters in dusty plasmas. — Phys. Rev. — 2004. — E 70 066404.