

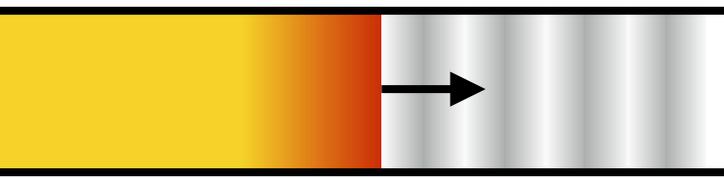
Динамические явления при распространении газовой детонации в неоднородных средах

Аслан Р. Касимов, Андрей Ю. Голдин

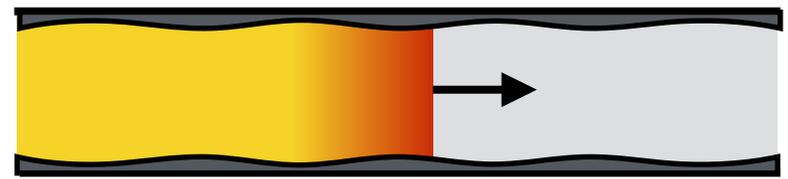
Сколковский институт науки и технологий
Москва

1. A. Kasimov, A. Gonchar, *ICDERS*, 2019
2. A. Kasimov, A. Gonchar, *Proceedings of Combustion Institute*, 2021
3. A. Kasimov, A. Goldin, *Shock Waves*, 2021
4. A. Goldin, A. Kasimov, *Journal of Fluid Mechanics*, 2022
5. A. Goldin, T. Medvedeva, A. Kasimov, *Physics of Fluids*, 2022

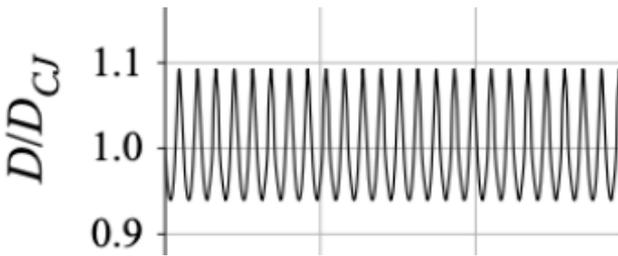
О чем доклад



$$T_a = T_0 + A(1 + \sin k\xi)$$



$$c_f = c_{f0}(1 + A \sin k\xi)$$



$$E > E_{cr}; \quad c_f = 0, A = 0$$

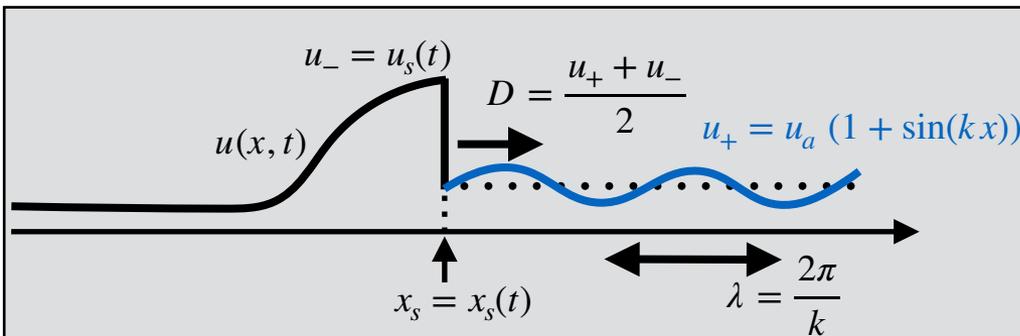
$$\rho_t + (\rho u)_x = 0$$

$$(\rho u)_t + (p + \rho u^2)_x = -\rho c_f u |u|$$

$$(\rho e_T)_t + (\rho u e_T + p u)_x = 0$$

$$(\rho \lambda)_t + (\rho u \lambda)_x = K \rho (1 - \lambda) \exp(-E/RT)$$

$$e_T = \frac{p v}{\gamma - 1} - \lambda Q + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T$$

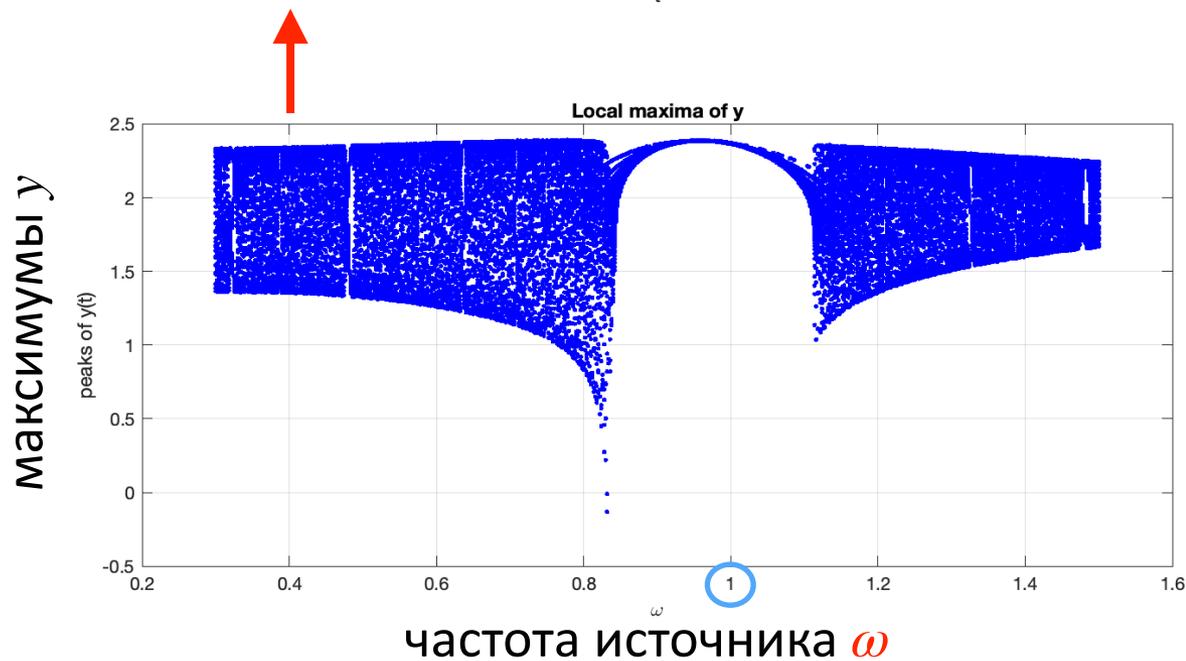
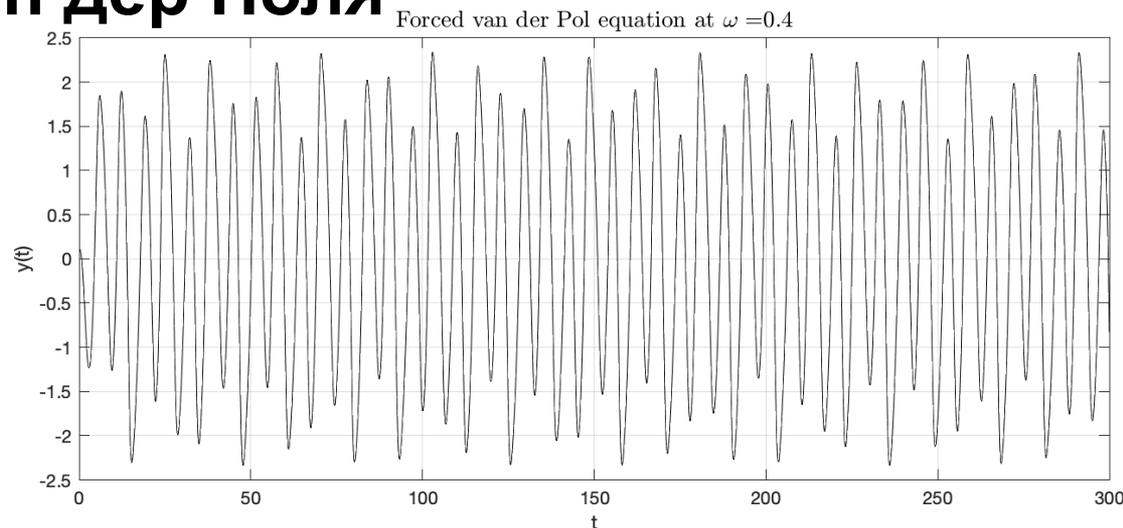


$$u_t + u u_x = f(x - x_s, u_s)$$

A. Kasimov, A. Gonchar, ICDEERS, 2019

Пример: уравнение Ван дер Поля

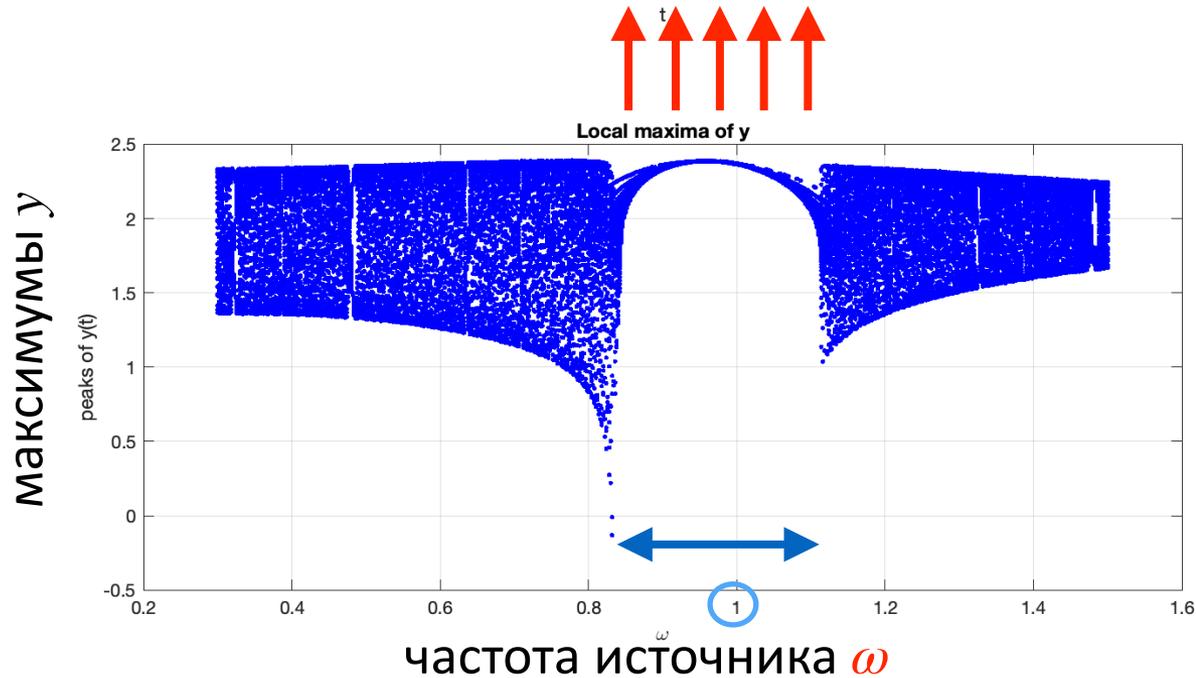
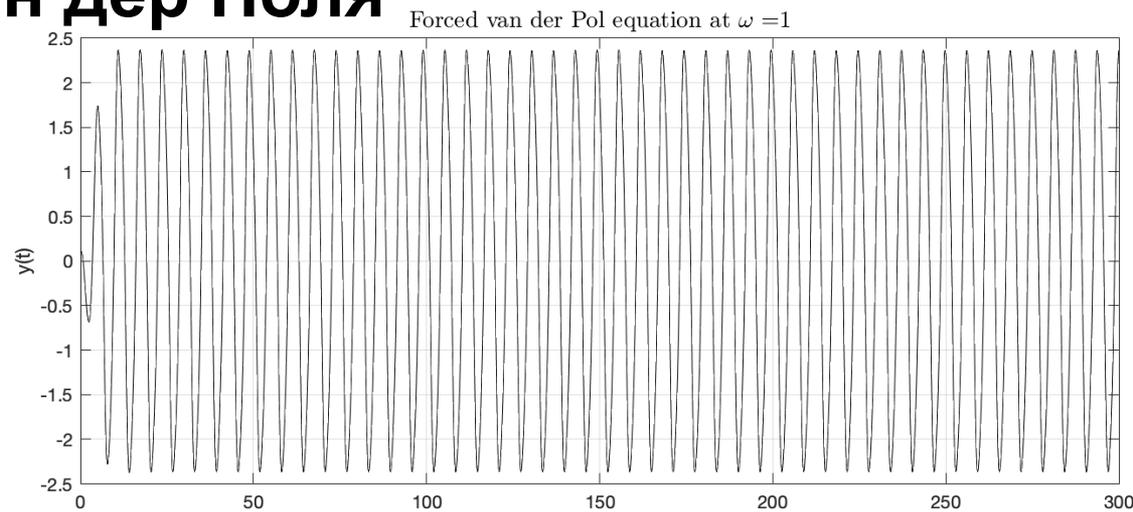
$$\ddot{y} + 0.5(y^2 - 1)\dot{y} + y = 0.5 \cos(\omega t)$$



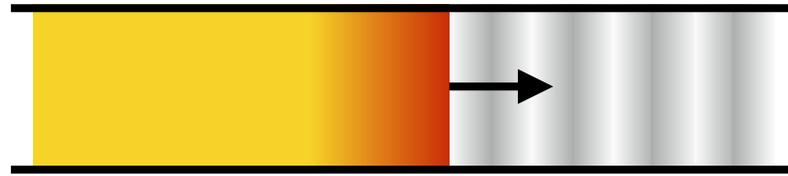
P. Manneville, *Instabilities, Chaos and Turbulence*, 2004

Пример: уравнение Ван дер Поля

$$\ddot{y} + 0.5(y^2 - 1)\dot{y} + y = 0.5 \cos(\omega t)$$



Одномерная детонация: постановка задачи



$$\rho_t + (\rho u)_x = 0$$

$$(\rho u)_t + (p + \rho u^2)_x = 0$$

$$(\rho e_T)_t + (\rho u e_T + p u)_x = 0$$

$$(\rho \lambda)_t + (\rho u \lambda)_x = K \rho (1 - \lambda) \exp(-E/RT)$$

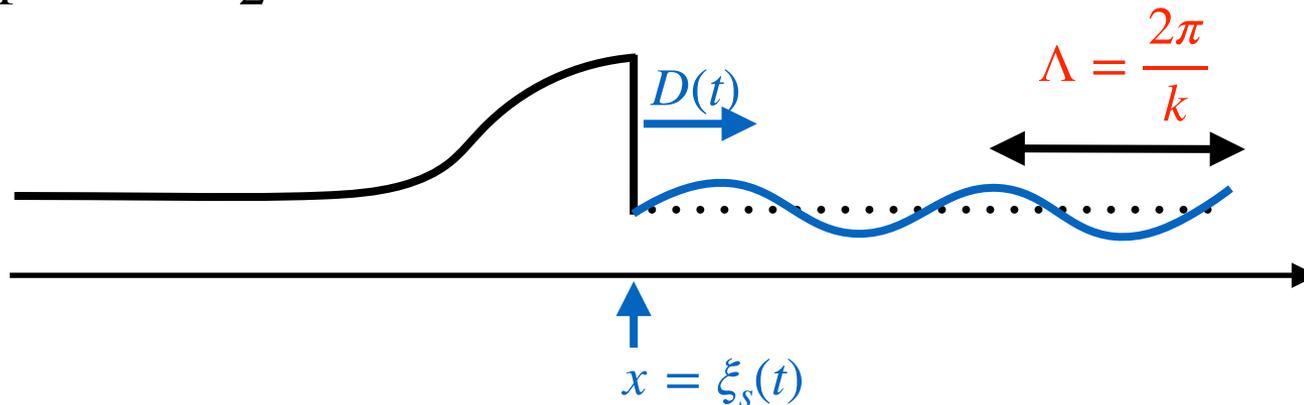
$$e_T = \frac{p v}{\gamma - 1} - \lambda Q + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T$$

$$T_a(\xi) = T_a + A(1 + \sin k\xi)$$

$$\lambda_a(\xi) = A(1 + \sin k\xi)$$

$$u_a(\xi) = 0$$

$$p_a(\xi) = p_a$$



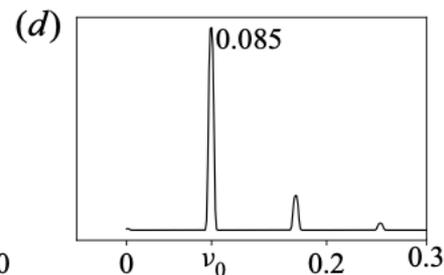
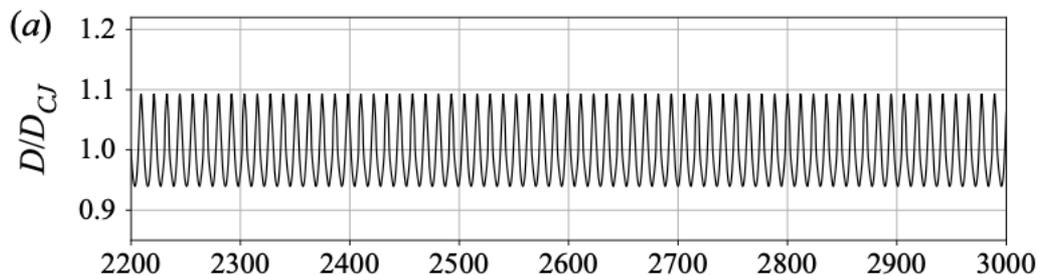
A. Kasimov, A. Goldin, Shock Waves, 2021
A. Goldin, A. Kasimov, JFM, 2022

Одномерная детонация: спектр Фурье

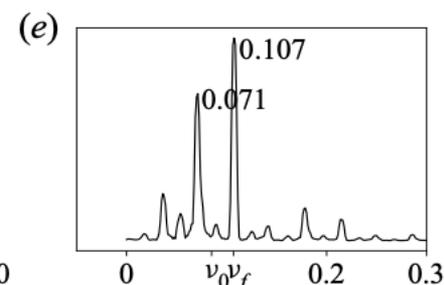
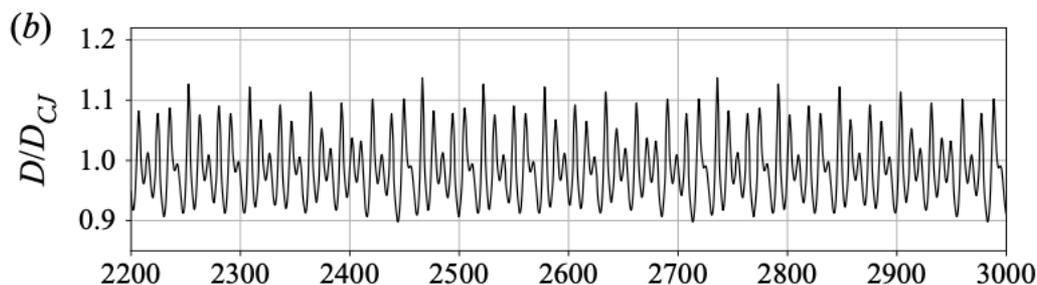
$$T_a(\xi) = T_a + A(1 + \sin k\xi)$$

$$k = 0.1$$

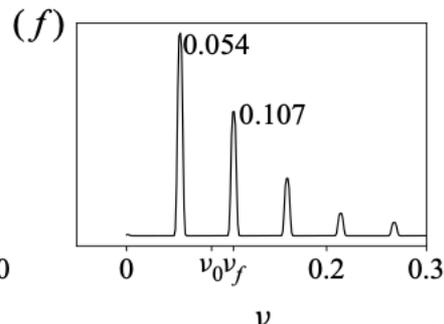
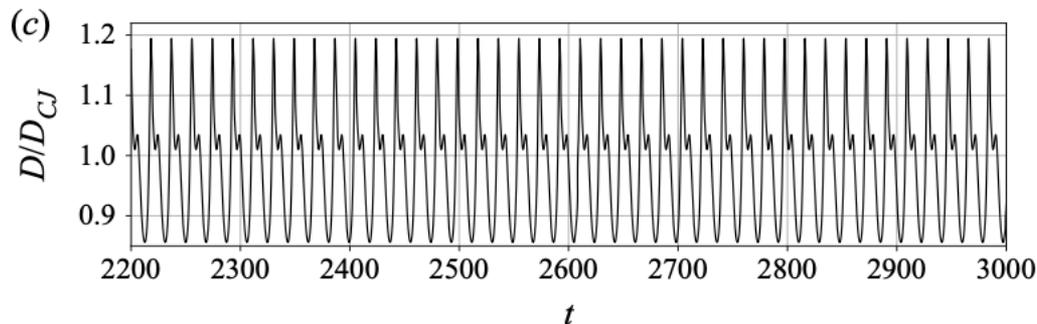
$$\lambda_a(\xi) = A(1 + \sin k\xi)$$



$$A = 0$$



$$A = 0.025$$



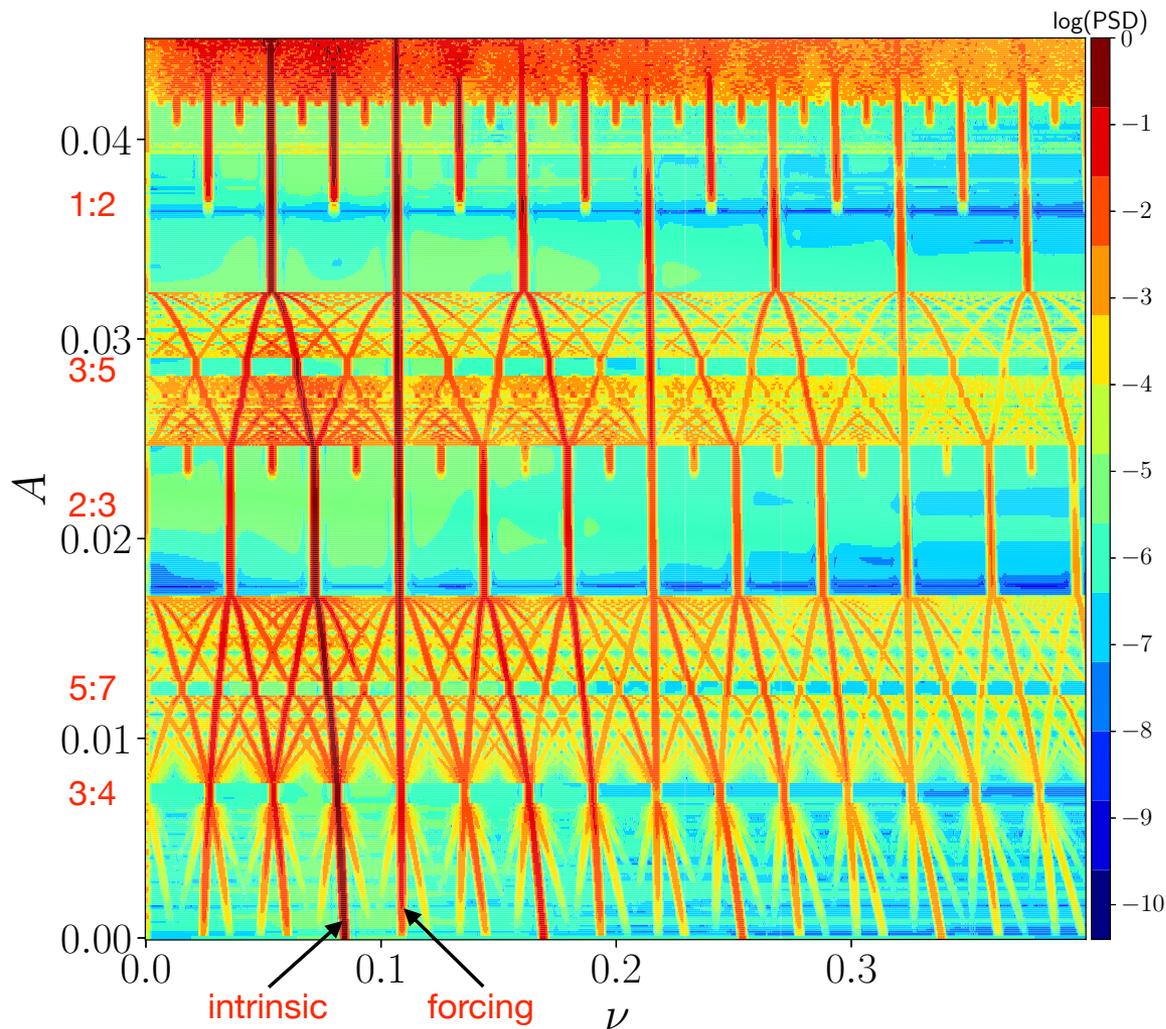
$$A = 0.035$$

A. Kasimov, A. Goldin, Shock Waves, 2021
A. Goldin, A. Kasimov, JFM, 2022

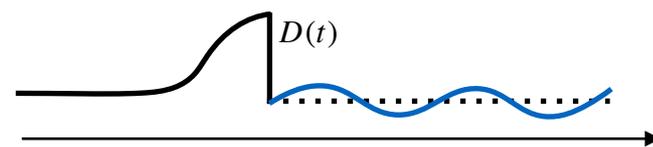
Одномерная детонация: спектрограмма

$$T_a(\xi) = T_a + A(1 + \sin k\xi) \quad k = 0.1$$

$$\lambda_a(\xi) = A(1 + \sin k\xi)$$



Синхронизация

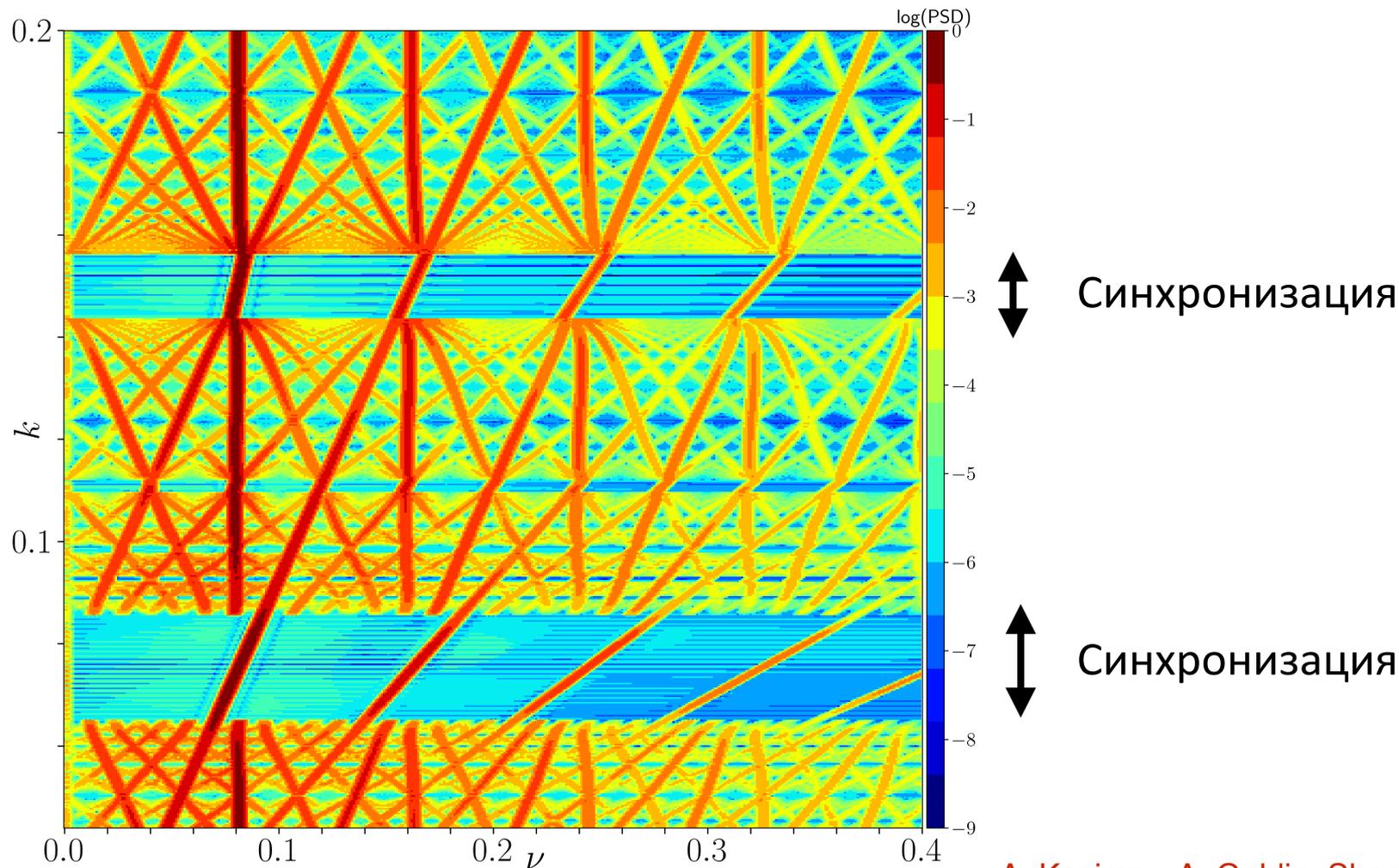


A. Goldin, A. Kasimov, JFM, 2022

Одномерная детонация: спектрограмма

$$T_a(\xi) = T_a + A(1 + \sin k\xi) \quad A = 0.01$$

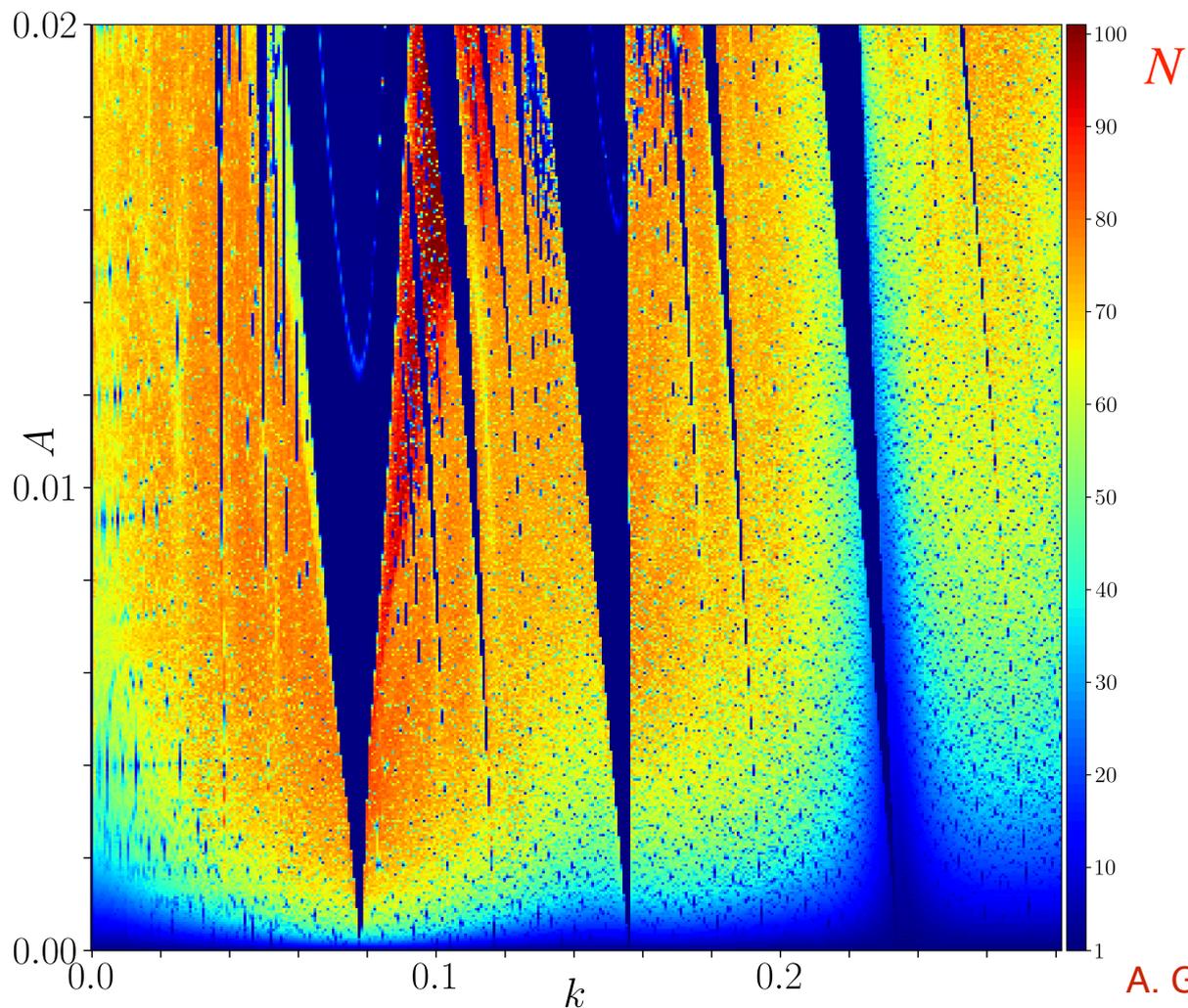
$$\lambda_a(\xi) = A(1 + \sin k\xi)$$



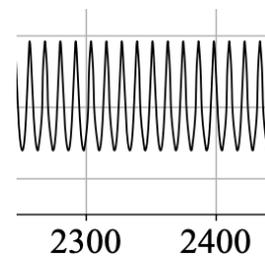
A. Kasimov, A. Goldin, Shock Waves, 2021

Одномерная детонация: языки Арнольда

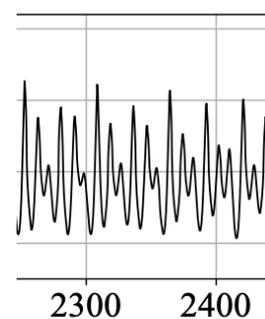
Число периодов как функция A и k



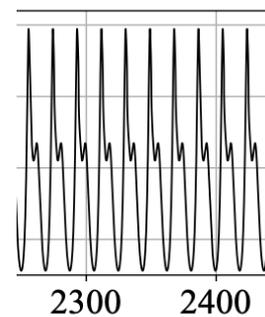
N



$N = 1$



$N \gg 1$

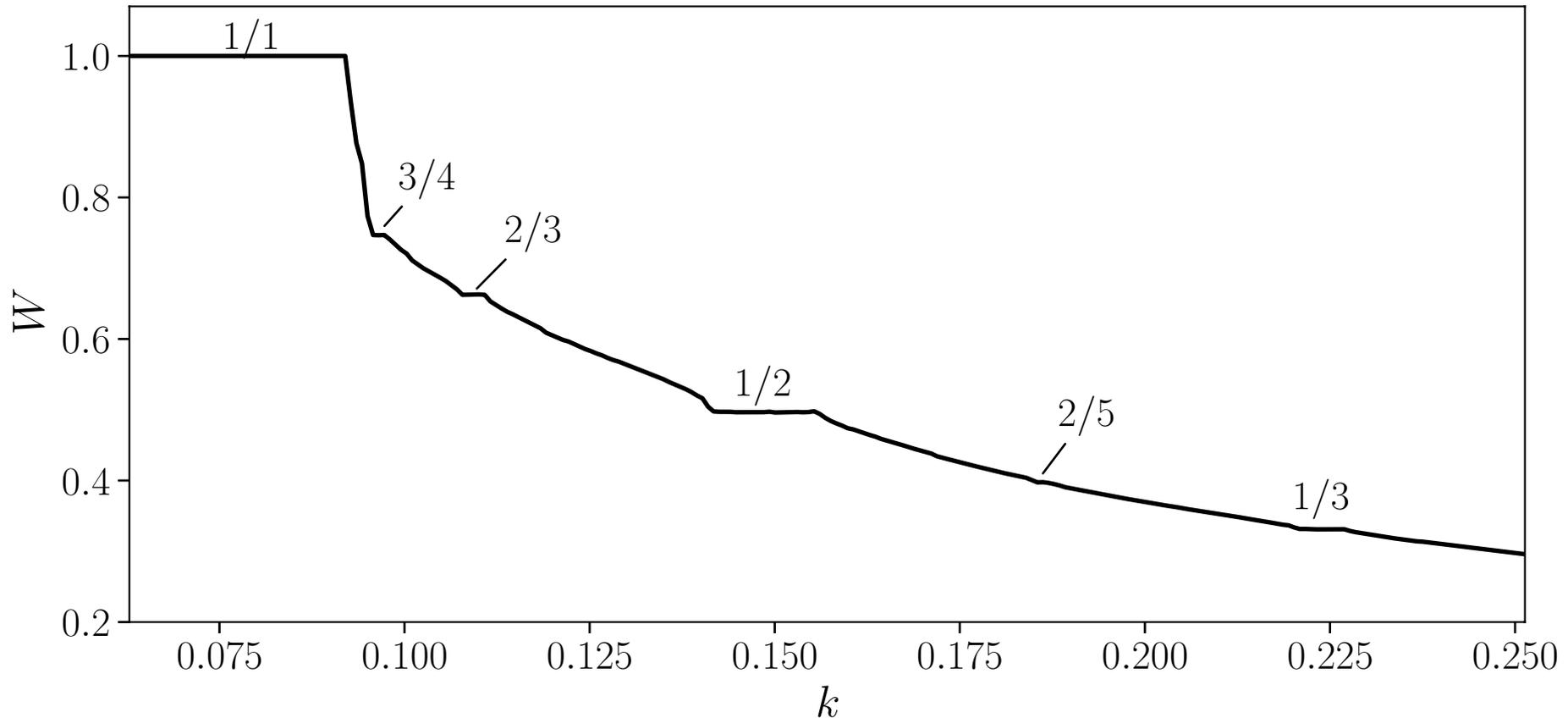


$N = 2$

A. Goldin, A. Kasimov, JFM, 2022

Одномерная детонация: дьявольская лестница

$$W = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\phi_n}{n} \quad \text{число вращений}$$



A. Goldin, A. Kasimov, JFM, 2022

Одномерная детонация с потерями

$$\rho_t + (\rho u)_x = 0$$

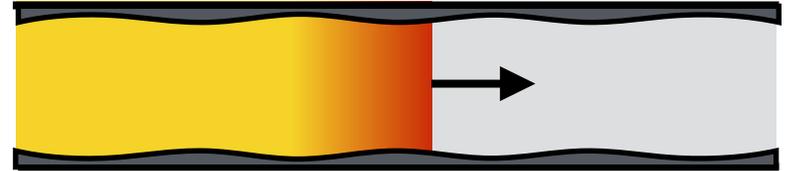
$$(\rho u)_t + (p + \rho u^2)_x = -\rho c_f u |u|$$

$$(\rho e_T)_t + (\rho u e_T + p u)_x = 0$$

$$(\rho \lambda)_t + (\rho u \lambda)_x = K \rho (1 - \lambda) \exp(-E/RT)$$

$$e_T = \frac{pv}{\gamma - 1} - \lambda Q + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho RT$$

$$Q = 50, \quad \gamma = 1.2$$



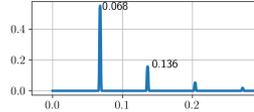
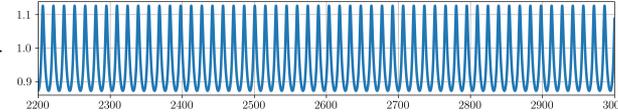
$$c_f = c_{f0}(1 + A \sin k\xi)$$

A. Goldin, T. Medvedeva, A. Kasimov, Physics of Fluids, 2022

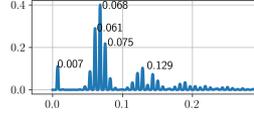
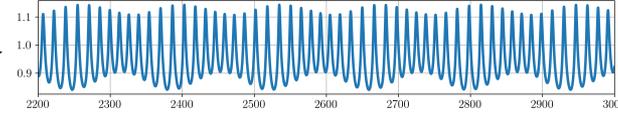
Одномерная детонация с потерями

$$c_f(\xi) = c_{f0} (1 + A \sin kx)$$

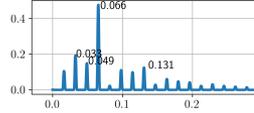
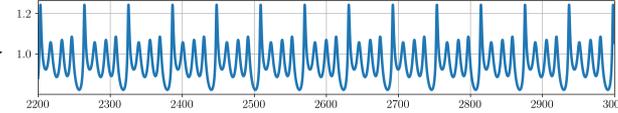
Однородное трение, $k = 0.0$



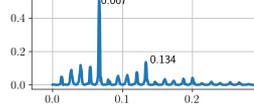
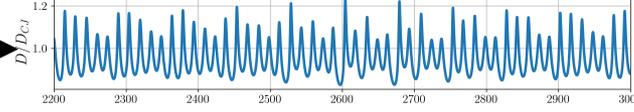
Модуляции, $k = 0.007$



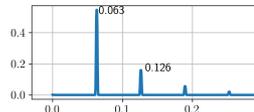
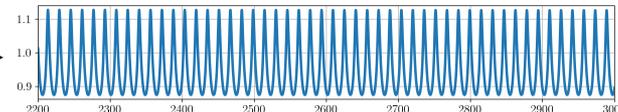
Предельный 4-цикл, $k = 0.0475$



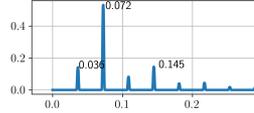
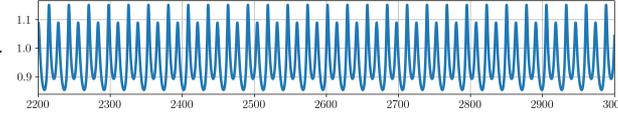
Нерегулярные колебания, $k = 0.052$



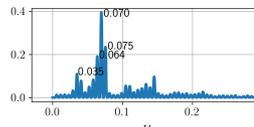
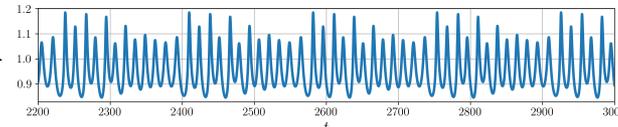
Захват частот, $k = 0.061$



Удвоение периода, $k = 0.07$



Нерегулярные колебания, $k = 0.073$



A. Goldin, T. Medvedeva, A. Kasimov, Physics of Fluids, 2022

Одномерная детонация с потерями

$$c_f(\xi) = c_{f0} (1 + A \sin kx)$$

$$A = 0.5$$

Линейные комбинации частот

$$l_w = 23\Delta - 25\Delta$$

Захват частот и удвоение периода

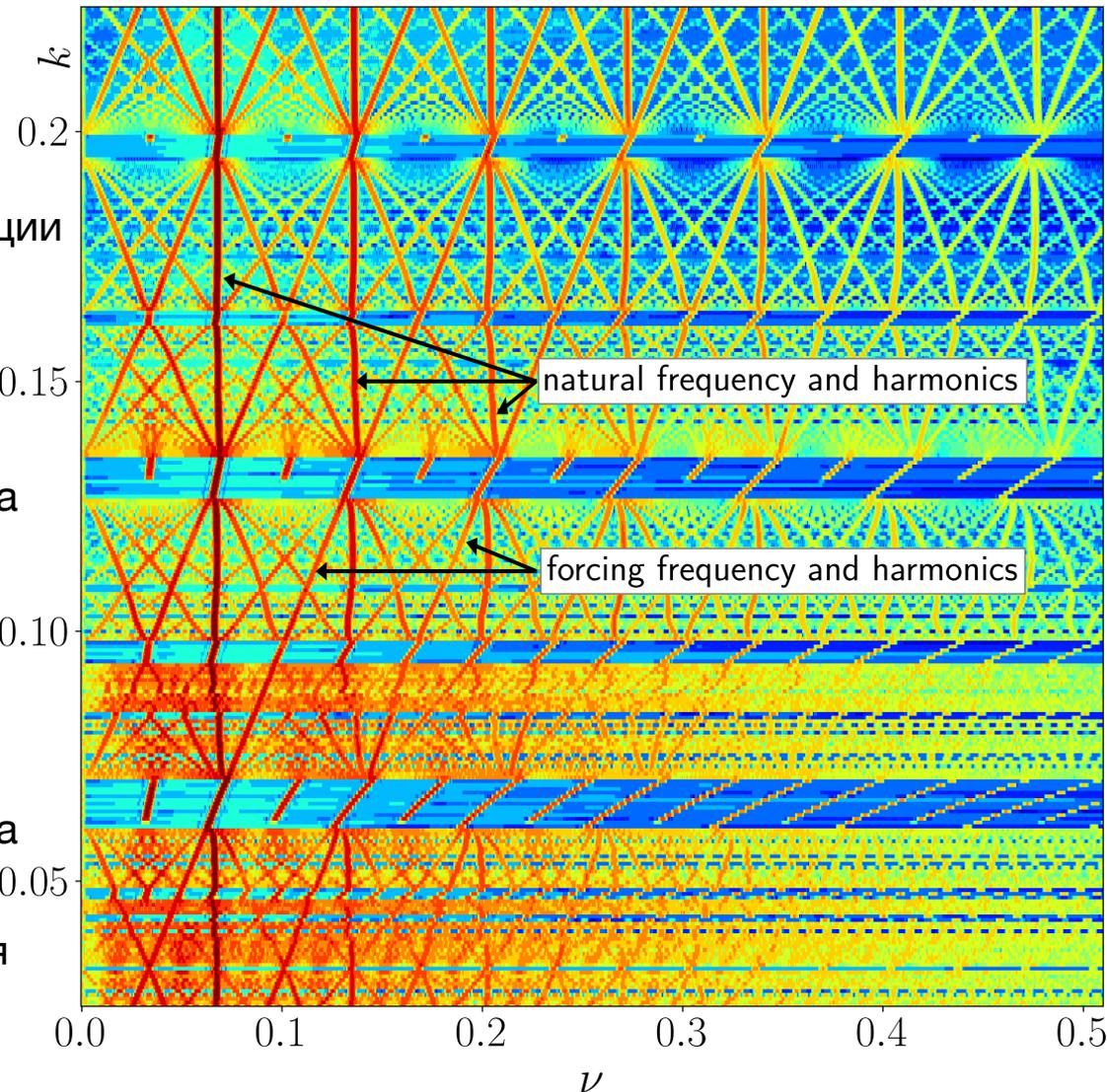
$$l_w = 32\Delta - 34\Delta$$

Период-2

$$l_w = 45\Delta - 51\Delta$$

Захват частот и удвоение периода

Нерегулярные колебания



A. Goldin, T. Medvedeva, A. Kasimov, Physics of Fluids, 2022

Δ размер зоны реакции

Выводы

1. При распространении неустойчивой детонации в периодически неоднородной среде или периодически шероховатом канале существует эффект синхронизации/регуляризации собственных колебаний детонационной волны под воздействием неоднородностей
2. Явление регуляризации собственных колебаний периодическим воздействием имеет общий характер для нелинейных систем и, следовательно, возможны и другие способы регуляризации.

Работа поддержана грантом РФФ #22-21-00902