



Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Люшнин Андрей Витальевич

**Процессы структурообразования на
свободной поверхности тонкого слоя
полярных жидкостей**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Представление диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



Формальные характеристики диссертации:

- Структура работы: введение, четыре главы, заключение, список литературы;
- Общий объём: 303 страницы, включая 72 рисунка;
- Список литературы: 143 наименований.



Публикации по теме диссертации:

- Всего публикаций: 37
- Из них статьи: 21
- Из них статьи из списка ВАК: 13



Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Индекс цитируемости:

Scholar Google	134
Scopus	92
Web of Science	90
eLIBRARY	87



Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Актуальность

Рассматриваемые в диссертации задачи широко представлены в практических задачах в области нанотехнологий, биохимии и полиграфии.

Цель работы

1. Изучение уравнений для описания эволюции свободной поверхности тонкого слоя испаряющейся полярной жидкости при различных осложняющих факторах.
2. Исследование влияния инжекционного механизма неустойчивости на конвективную устойчивость слоя слабопроводящей полярной жидкости.

Научная новизна

- 1 В диссертации впервые получены результаты, описывающие эволюцию тонкого слоя полярной жидкости при испарении, эффекта Марангони и растворимого сурфактанта.
2. Впервые изучено взаимодействие инжекционного и термокапиллярного механизмов неустойчивости для электрогидродинамической системы

Практическая ценность

Результаты могут быть применены при создании технологических приборов



Глава 2

Пальцеобразная неустойчивость тонкого слоя испаряющейся водяной пленки

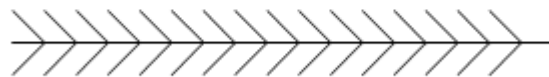
«Толстый» слой жидкости

«Тонкий» слой жидкости

Воздух-жидкость

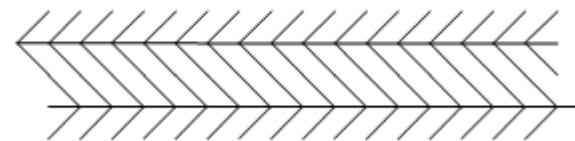


Объемная фаза жидкости



Жидкость - твердое тело

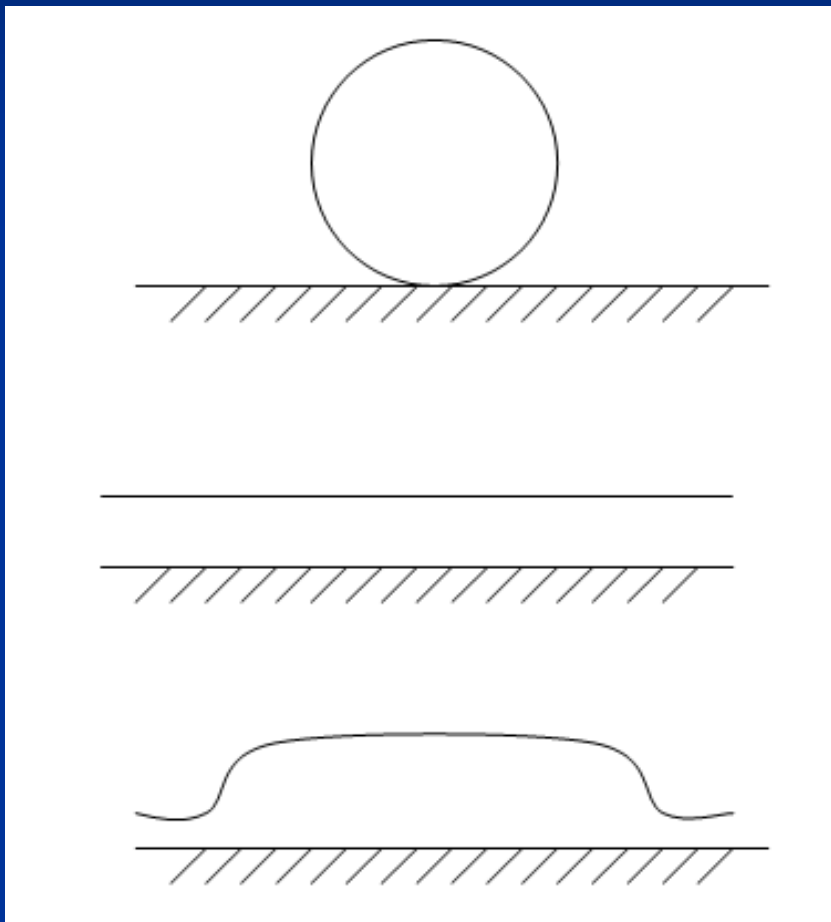
Воздух-жидкость



Жидкость – твердое тело



Различные виды испарения жидкостей



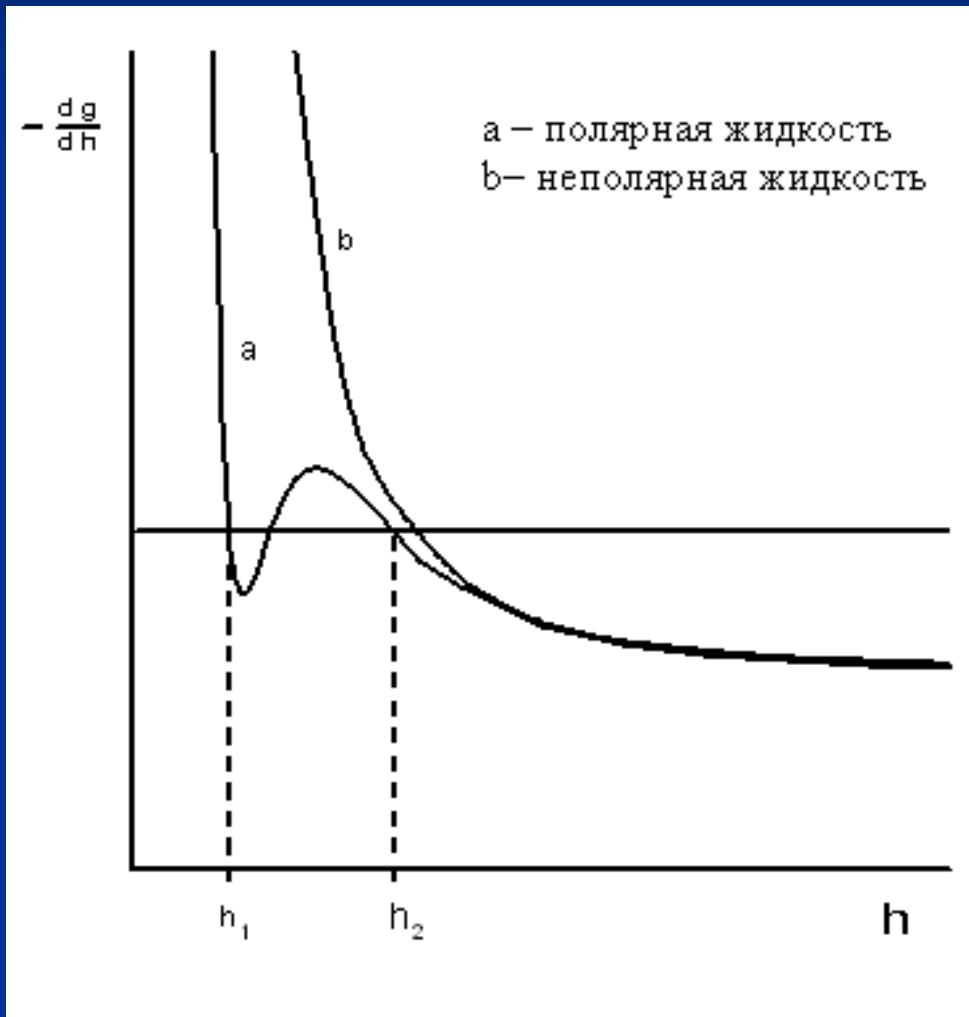
Не смачиваемая жидкость

Смачиваемая неполярная жидкость

Смачиваемая полярная жидкость



A.Sharma 1989



$$g(h) = -\frac{A}{12\pi h^2} + S^p \cdot \exp\left(\frac{d_0 - h}{l_0}\right)$$

g - есть свободная энергия взаимодействия поверхности «жидкость-твёрдое тело»,



N.Samid-Merez, S.G.Lipson D.S. Tannhauser
1998

Эволюционное уравнение для испаряющегося тонкого слоя полярной жидкости

$$\partial_t h = \nabla \left[h^3 \nabla \left(\frac{1}{h^3} - \exp(-\chi h) - \nabla^2 h \right) \right] - \Omega \left(\frac{1}{h^3} - \exp(-\chi h) - \nabla^2 h - S \right)$$

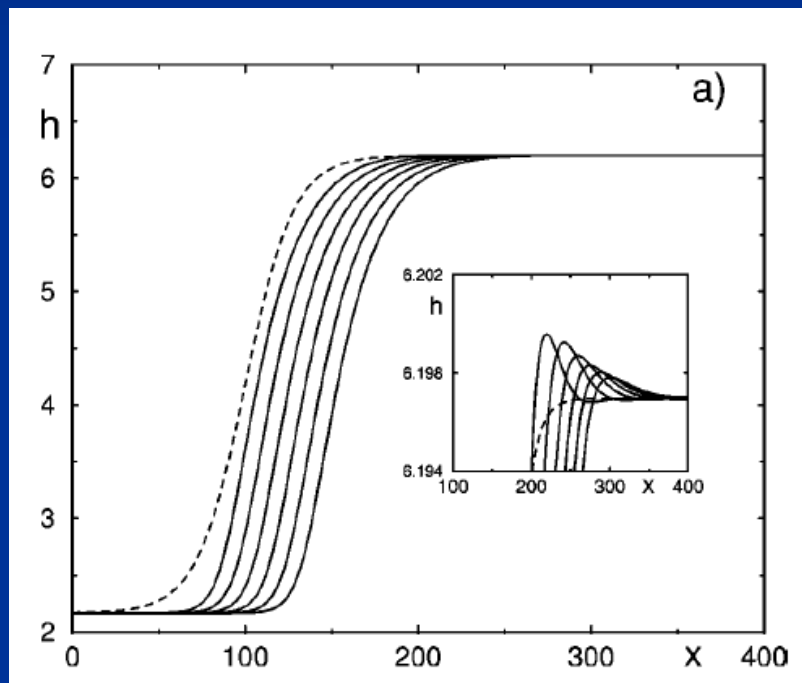
$$\Omega = \frac{3\varepsilon\nu\sigma}{S^{PN}} \left(\frac{6\pi S^{PN}}{A} \right)^{2/3}, \quad S = \frac{\rho\mu_v}{S^{PN}}, \quad \chi = \frac{1}{l_0} \left(\frac{A}{6\pi S^{PN}} \right)^{1/3}$$

Параметры Ω, S, χ характеризуют уровень испарения,

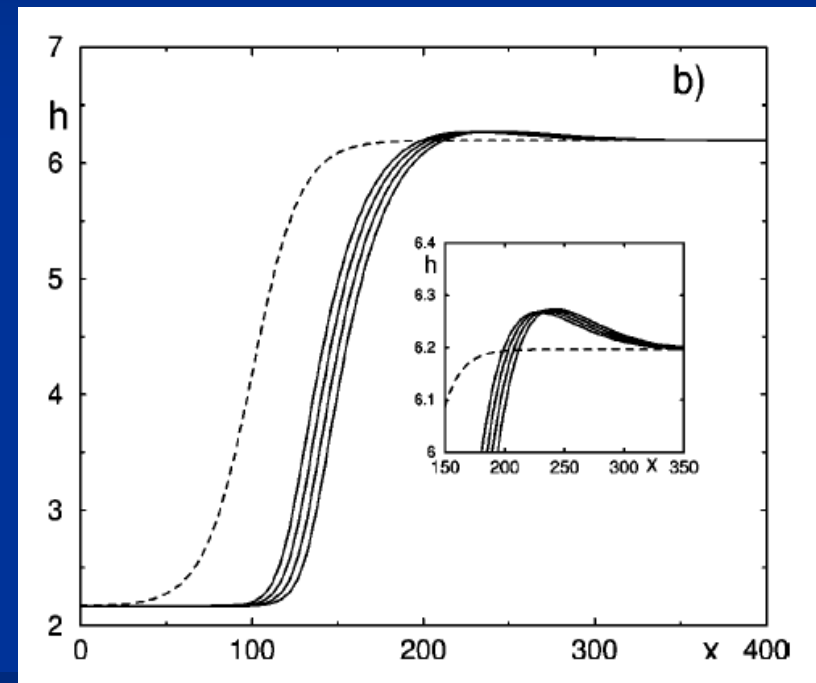
химический потенциал пара и дебаевскую длину, соответственно



Эволюция движения фронта для различных значений испарения



$$\Omega = 0.1$$

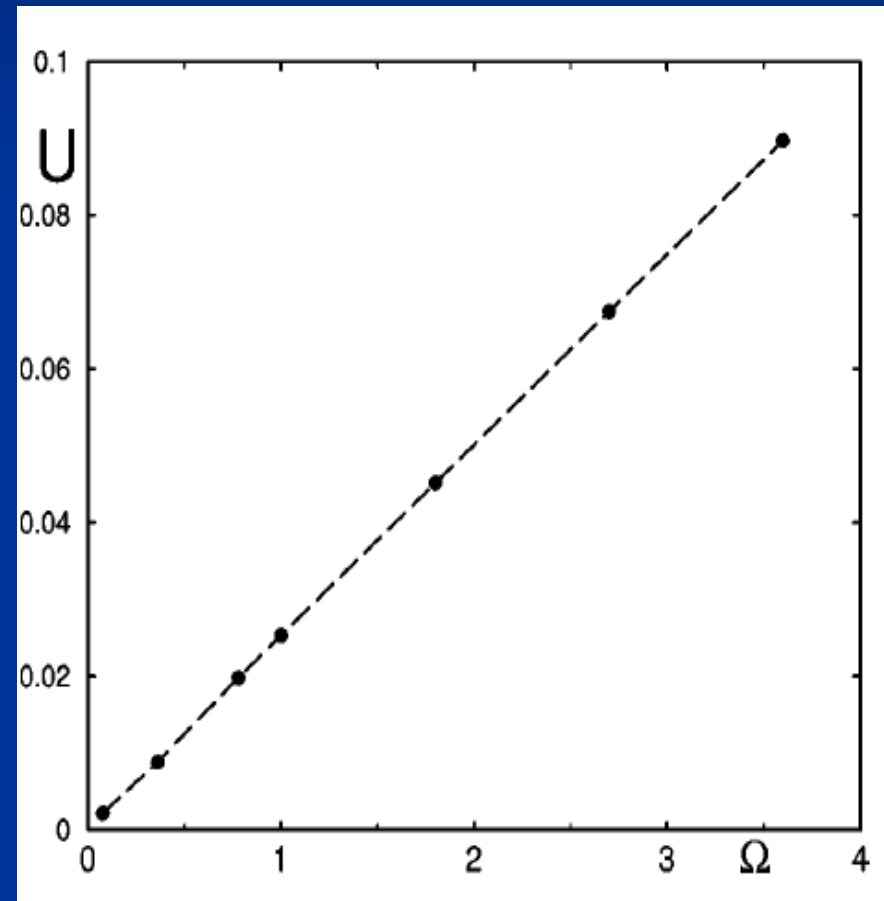


$$\Omega = 0.007$$



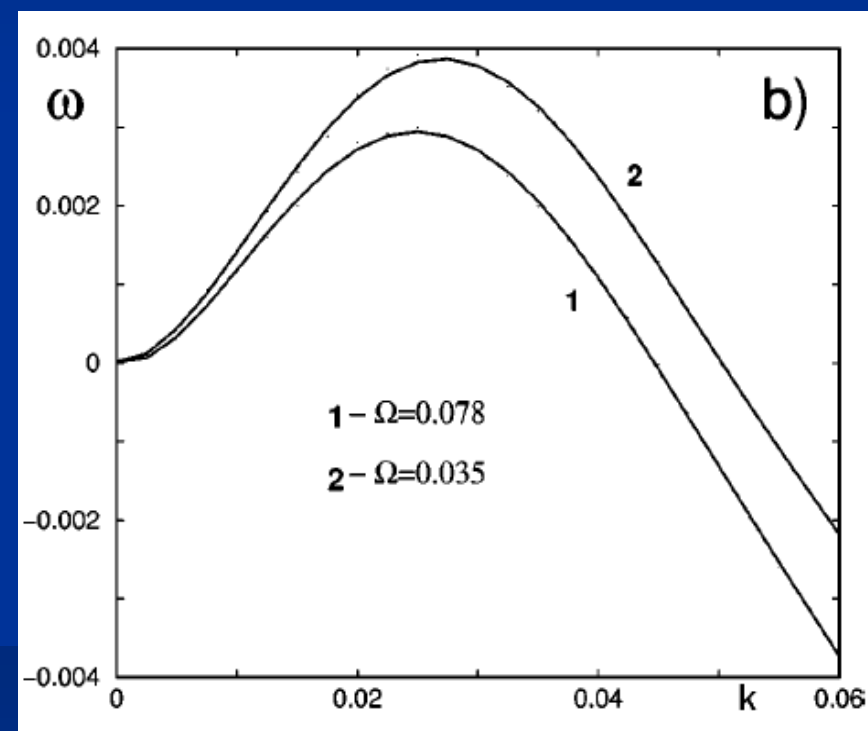
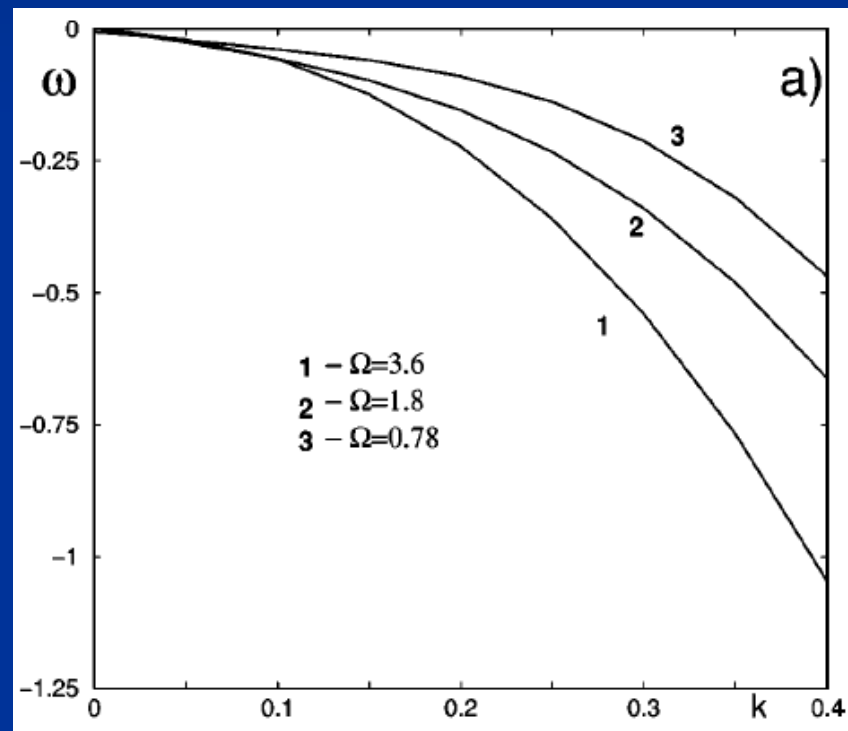
Уравнение для скорости движения фронта как функции испарения

$$U = \frac{\Omega}{h_2 - h_1} \int_{-\infty}^{\infty} \left(-\frac{1}{h^3} + e^{-\chi h} \right) dx,$$



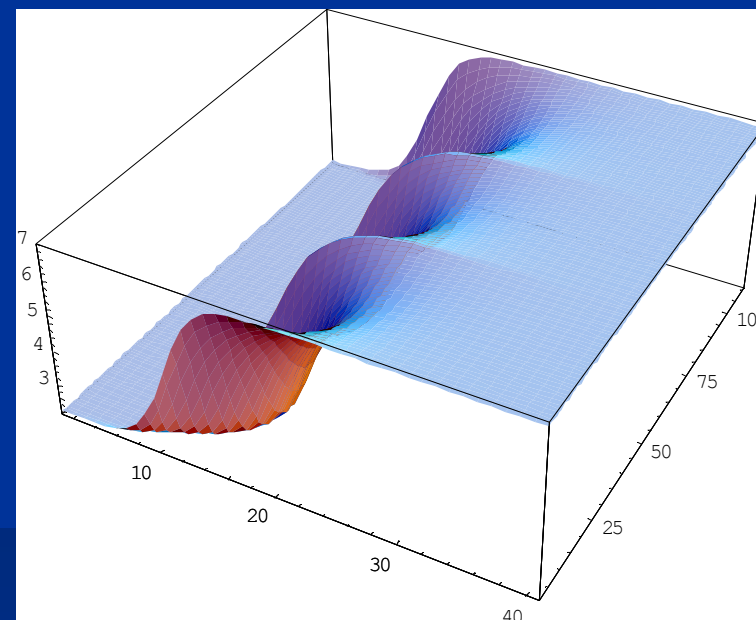
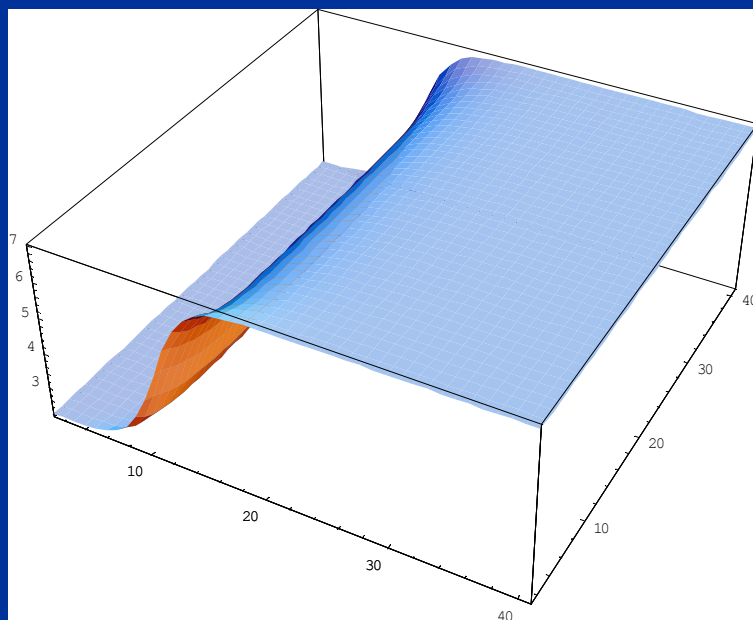


Эволюция поперечных возмущений для различных значений параметра испарения



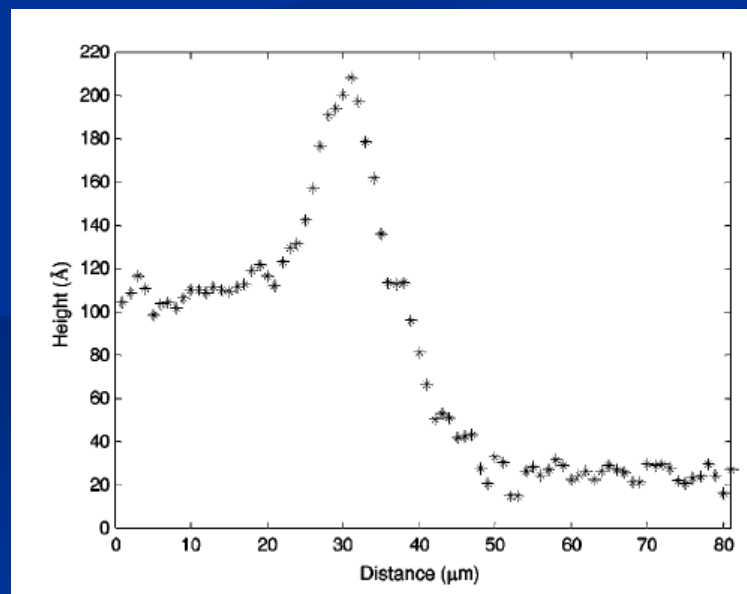
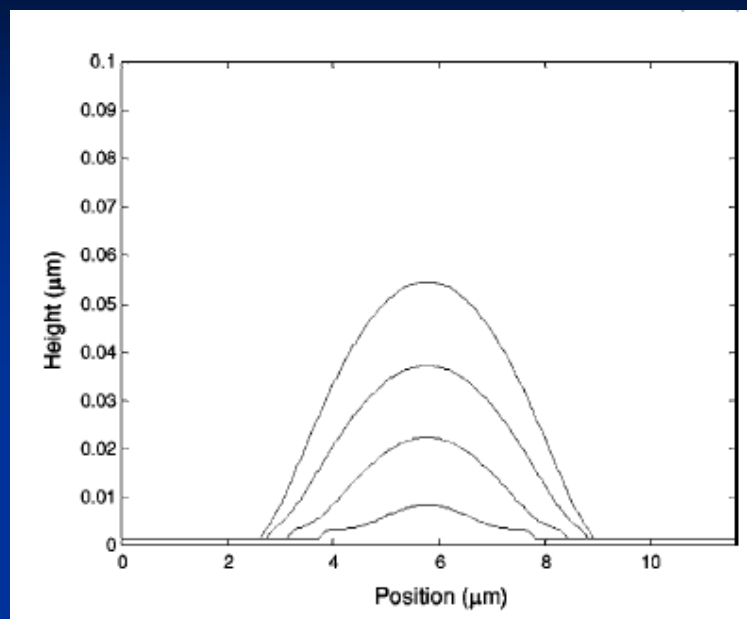
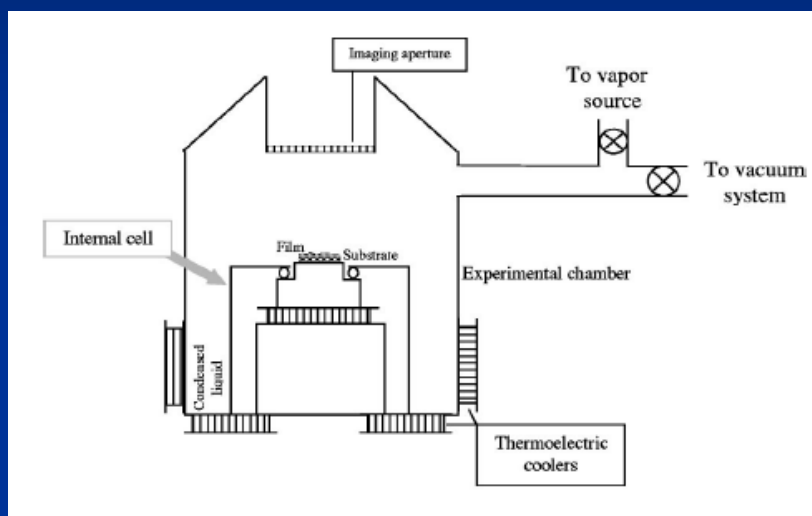


3D моделирование движения фронта.
Пальцеобразная неустойчивость для
малых значений параметра испарения





Экспериментальная установка

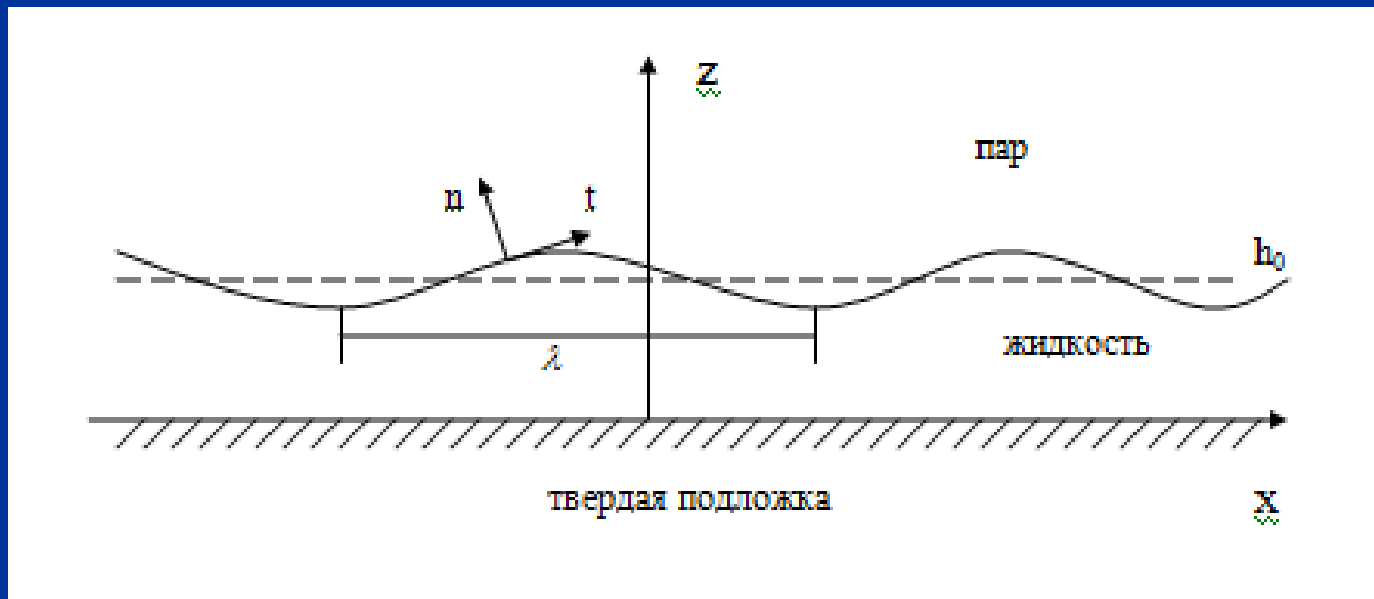




Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Глава 3

Влияние термокапиллярного эффекта на динамику и устойчивость движения испаряющейся тонкой пленки





Система уравнений и граничные условия

$$\begin{aligned}\rho(\partial_t u + u \partial_x u + w \partial_z u) &= -\partial_x(p + \phi) + \mu \nabla^2 u, \\ \rho(\partial_t w + u \partial_x w + w \partial_z w) &= -\partial_z(p + \phi) + \mu \nabla^2 w, \\ \rho c (\partial_t T + u \partial_x T + w \partial_z T) &= k_{th} \nabla^2 T, \\ \partial_x u + \partial_z w &= 0.\end{aligned}$$

$$z = 0: \quad u = 0, w = 0$$

$$\begin{aligned}z = h: \quad \partial_t h + u \partial_x h &= w \\ \bar{T} \cdot \bar{n} &= -\sigma K \cdot \bar{n} + \bar{t} \nabla_s \sigma \\ -k_{th} \bar{n} \cdot \nabla_1 T &= \alpha_{th} (T - T_v)\end{aligned}$$

$$\bar{n} = \frac{(-\partial_x h, 1)}{[1 + (\partial_x h)^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad \bar{t} = \frac{(1, \partial_x h)}{[1 + (\partial_x h)^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad K = \frac{\partial_x^2 h}{[1 + (\partial_x h)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\sigma = \sigma_v - \mathcal{G}(T - T_v)$$

ϕ - дополнительный потенциал энергии слоя, возникающий в результате межмолекулярного взаимодействия (подложка-жидкость, жидкость-пар)



Длинноволновое приближение задачи

$$\varepsilon = 2\pi h_0 / \lambda \ll 1$$

$$U = U_0 + \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \dots$$

$$W = W_0 + \varepsilon W_1 + \varepsilon^2 W_2 + \dots$$

$$P = P_0 + \varepsilon P_1 + \varepsilon^2 P_2 + \dots$$



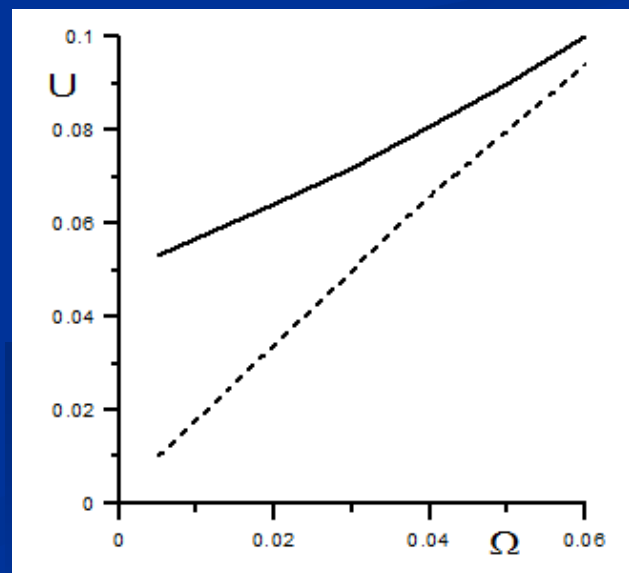
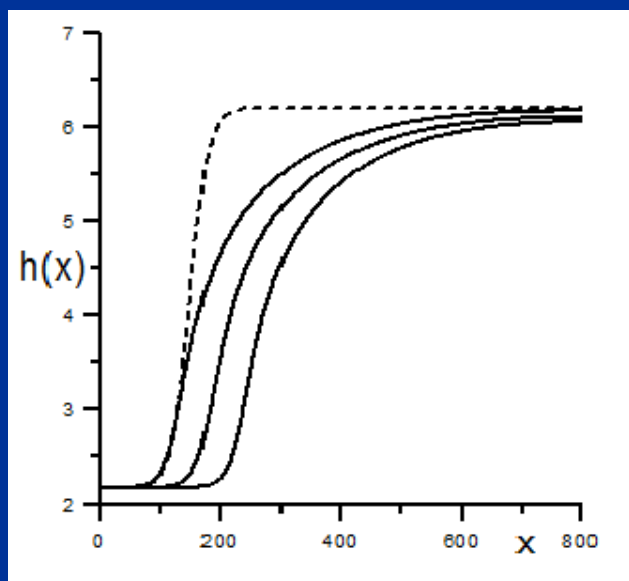
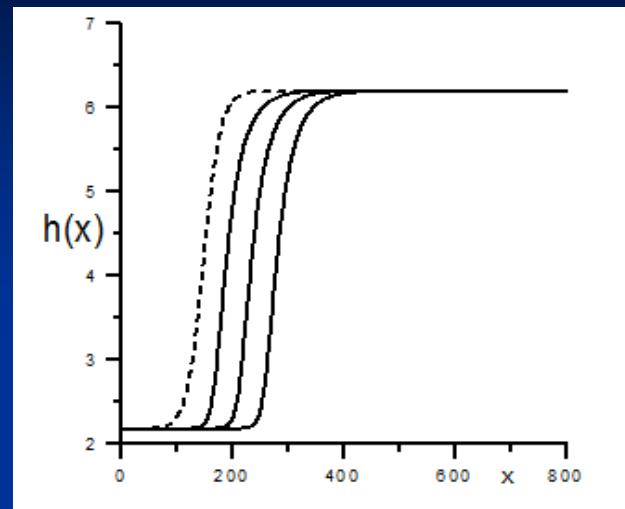
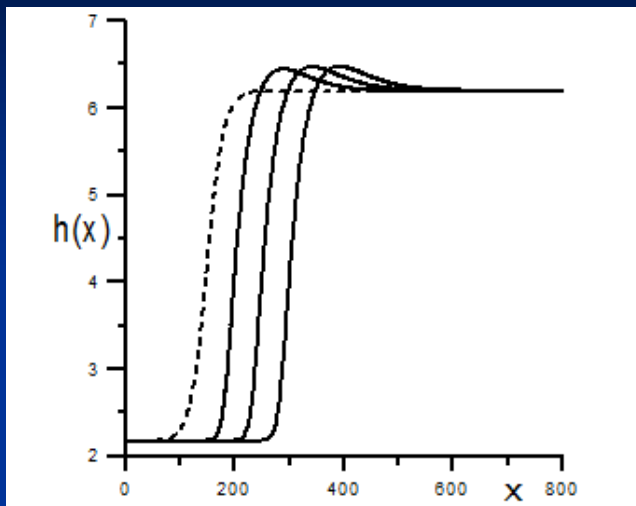
Эволюционное уравнение

$$\partial_t h = -MB \nabla \left(\frac{h^2 \nabla h}{(1+Bh)^2} \right) + \nabla \left[h^3 \nabla \left(\frac{1}{h^3} - \exp(-\chi h) - \nabla^2 h \right) \right] - \Omega \left(\frac{1}{h^3} - \exp(-\chi h) - \nabla^2 h - S \right)$$

$$M = \frac{g \Theta_v}{2\sigma}; B = \frac{\alpha_{th}}{k_{th}} \left(\frac{A}{6\pi S^{PN}} \right)^{1/3}; \Omega = \frac{3\varepsilon V \sigma}{S^{PN}} \left(\frac{6\pi S^{PN}}{A} \right)^{2/3}; S = \frac{\rho \mu_v}{S^{PN}}; \chi = \frac{1}{l_0} \left(\frac{A}{6\pi S^{PN}} \right)^{1/3}$$



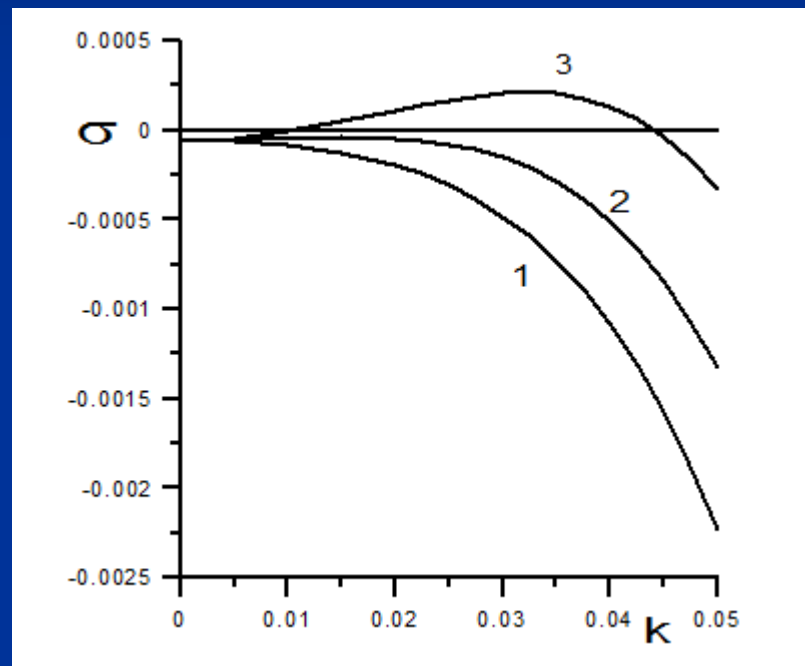
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет



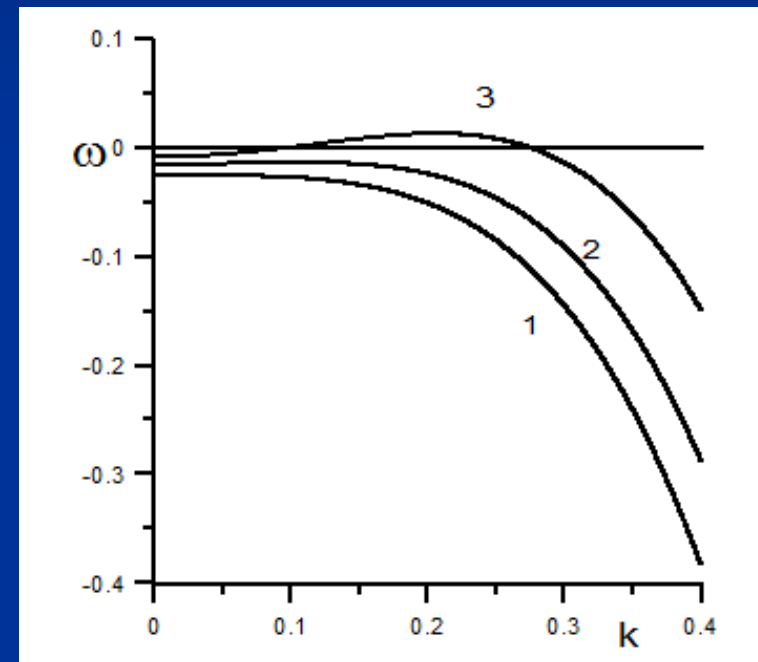


Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Дисперсионная зависимость
относительно продольных возмущений



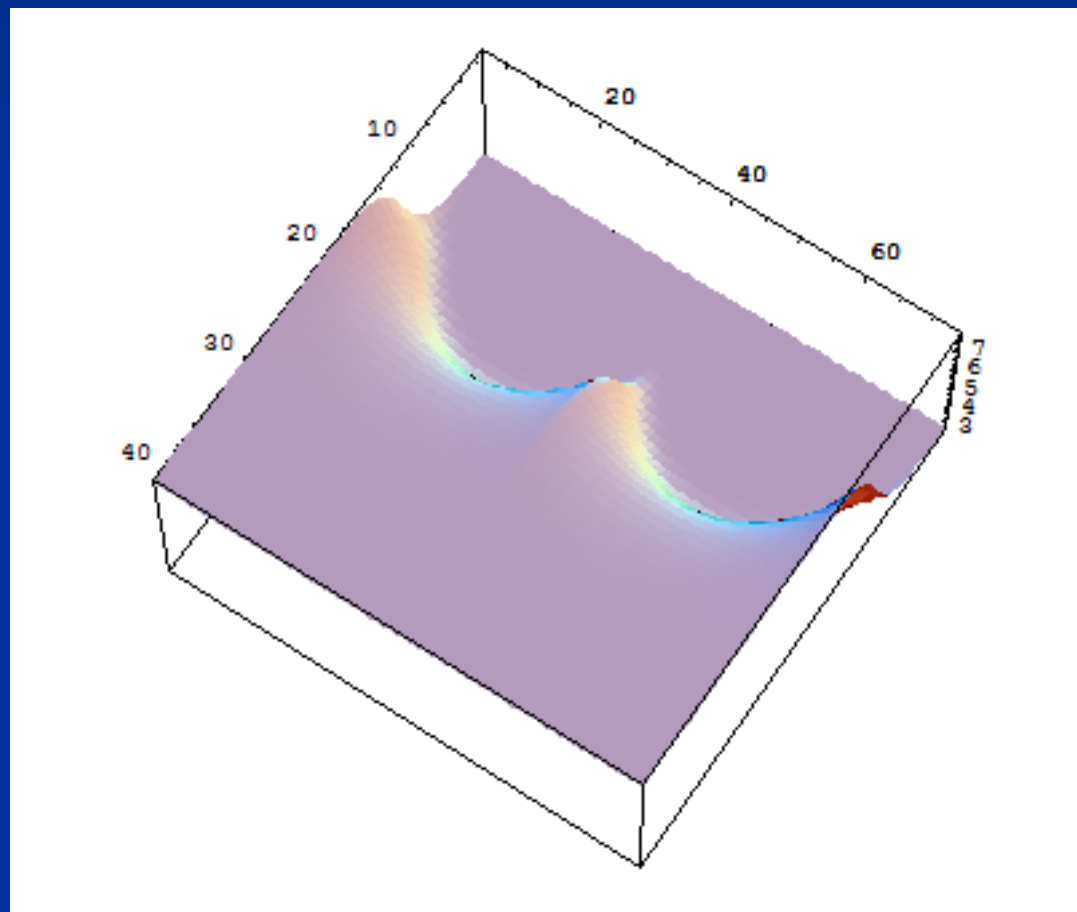
Дисперсионная зависимость
относительно поперечных возмущений





Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

3D- моделирование эволюции движения фронта относительно поперечных возмущений





Глава 4

Особенности испарения тонкого слоя воды в присутствии растворимого сурфактанта

Система уравнений

$$\begin{aligned}\rho(\partial_t u + u\partial_x u + w\partial_z u) &= -\partial_x(p + \phi) + \mu \nabla^2 u, \\ \rho(\partial_t w + u\partial_x w + w\partial_z w) &= -\partial_z(p + \phi) + \mu \nabla^2 w, \\ \rho(\partial_t c + u\partial_x c + w\partial_z c) &= D_b \nabla^2 c, \\ \partial_x u + \partial_z w &= 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\partial_t s + \nabla_s \cdot (\mathbf{v}_s s) + (\nabla_s \cdot \mathbf{n})c(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) &= D_s \nabla_s^2 c + J \\ J &= -D_b(\nabla c \cdot \mathbf{n}) = k_1 c - k_2 s\end{aligned}$$

$$\sigma = \sigma_0 - \mathcal{G}s$$



Длинноволновое приближение задачи

$$\varepsilon = 2\pi h_0 / \lambda = h_0 / L \ll 1$$

$$U = U_0 + \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \dots$$

$$W = W_0 + \varepsilon W_1 + \varepsilon^2 W_2 + \dots$$

$$P = P_0 + \varepsilon P_1 + \varepsilon^2 P_2 + \dots$$

$$C = C_0 + \varepsilon C_1 + \varepsilon^2 C_2 + \dots$$



Эволюционное уравнение и безразмерные параметры

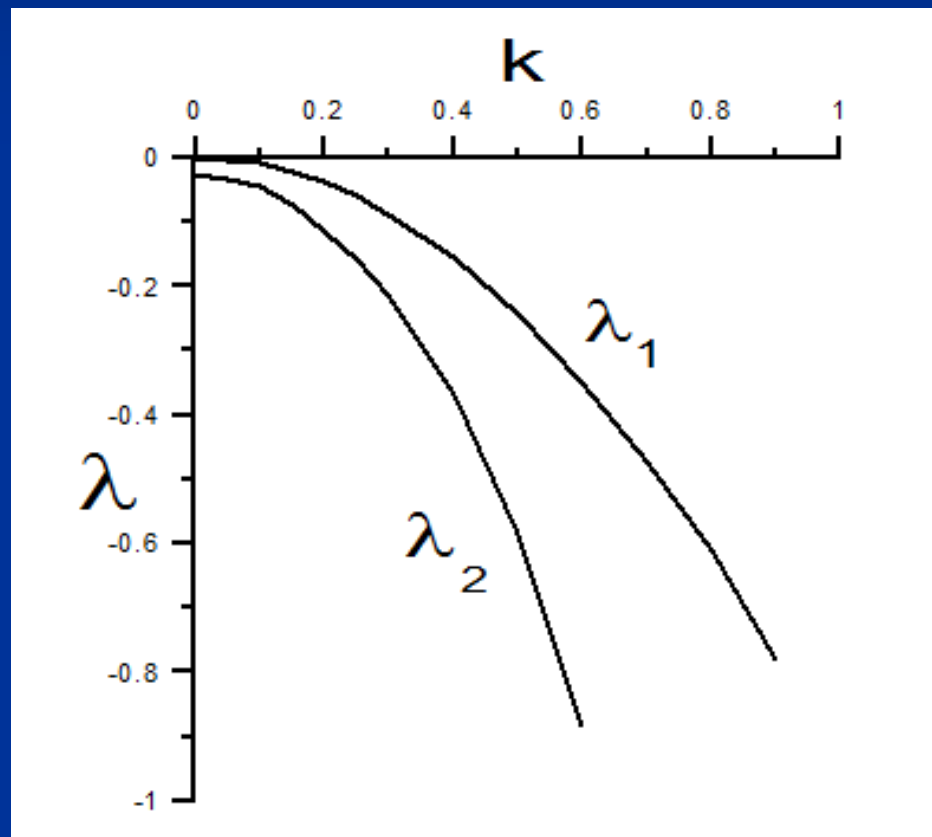
$$\begin{aligned}\partial_T H = & -Ma_\epsilon \partial_X \left(\frac{H^2}{2} \partial_X C_0 \right) + \partial_X \left(H^3 \partial_X \left(-Ca \partial_X^2 H + \left[\frac{1}{H^3} - \exp(-\chi H) \right] \right) \right) \\ & - \Omega \cdot \left(-Ca \partial_X^2 H + \left[\frac{1}{H^3} - \exp(-\chi H) \right] - R \right) \\ (\beta + H) \partial_T C_0 = & \frac{\beta}{Pe_s} \partial_X^2 C_0 + \frac{1}{Pe_b} \partial_X (H \partial_X C_0) - Ma_\epsilon (\partial_X C_0)^2 \left(\beta \cdot H + \frac{H^2}{2} \right) \\ & - \left(H^2 \left(\frac{\beta}{2} + H \right) \right) \cdot \partial_X C_0 \partial_X \left(-Ca \partial_X^2 H + \left[\frac{1}{H^3} - \exp(-\chi H) \right] \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Omega = \frac{3\psi\mu\sigma}{\rho S^{PN} h_0^2}, \quad R = \frac{\rho\mu_v}{S^{PN}}, \quad \chi = \frac{h_0}{l_0}, \quad \beta = k_1/(k_2 h_0), \quad Pe_b = U_0 L/D_b, \\ Pe_s = U_0 L/D_s, \quad Ma_\epsilon = \mathcal{G} \cdot s_0/\sigma_0, \quad Ca = \varepsilon^3 \sigma_0/(\mu U_0)\end{aligned}$$



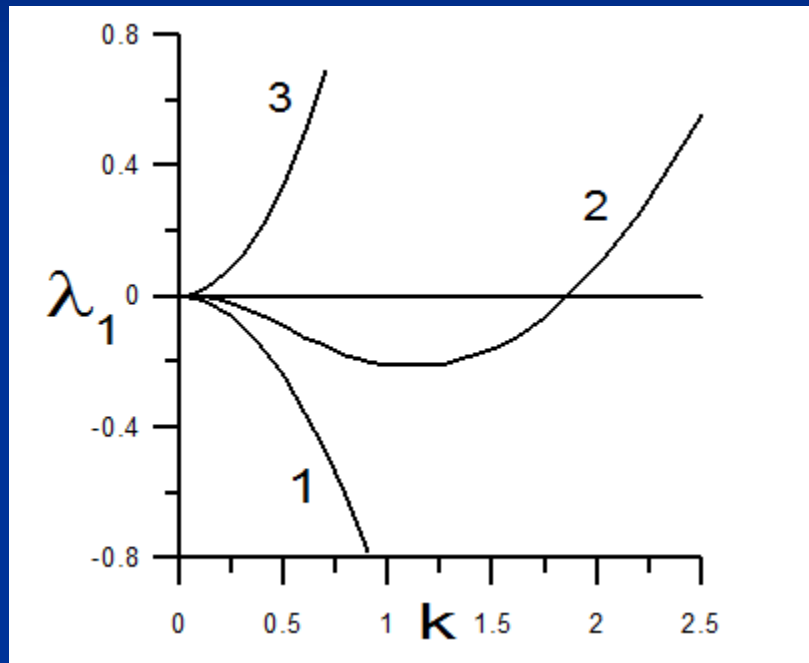
Исследование возмущений относительно «замороженного» состояния

$$H_0 = 1 \text{ и } C_0 = 1$$

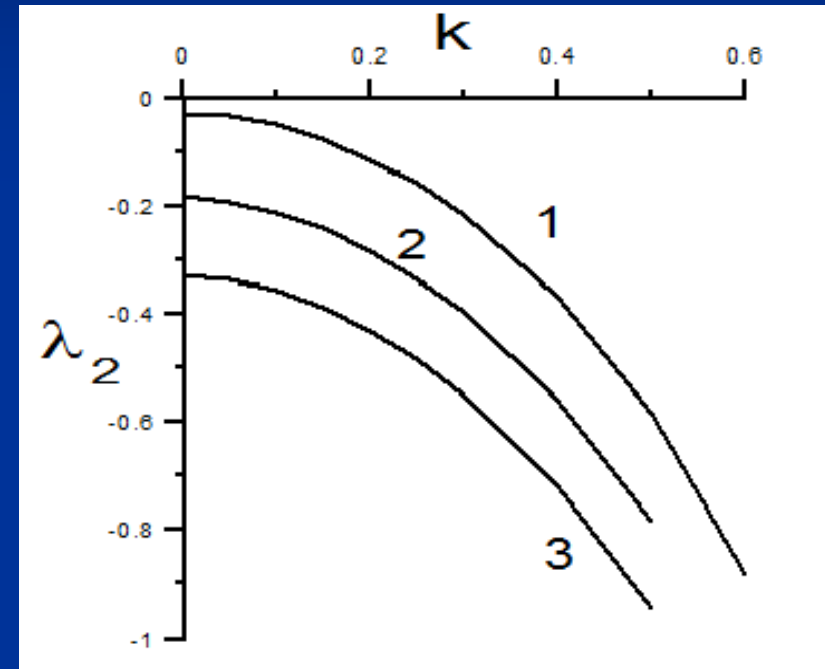




Концентрационная мода

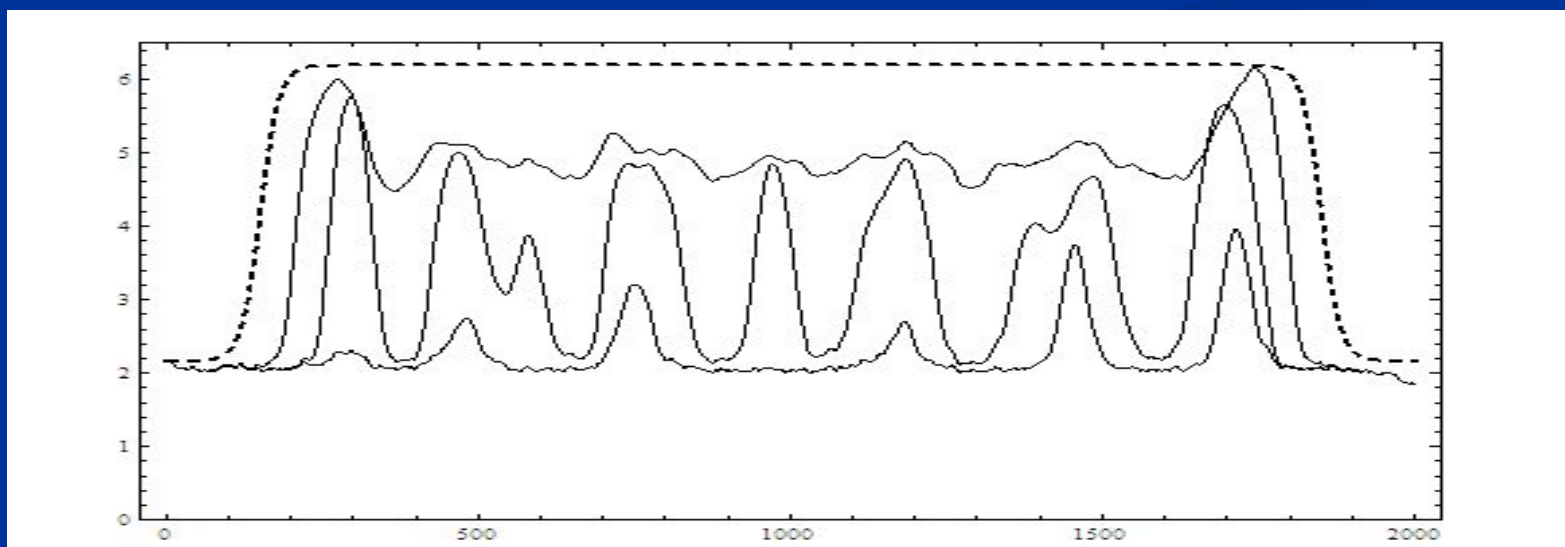
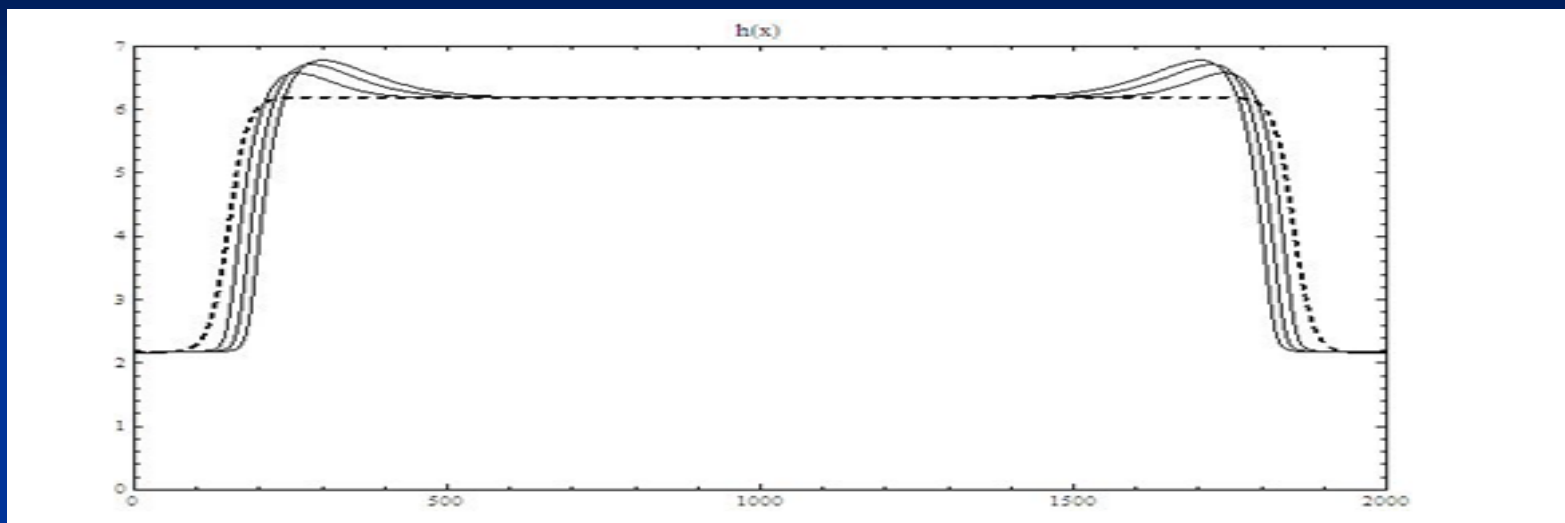


Мода испарения



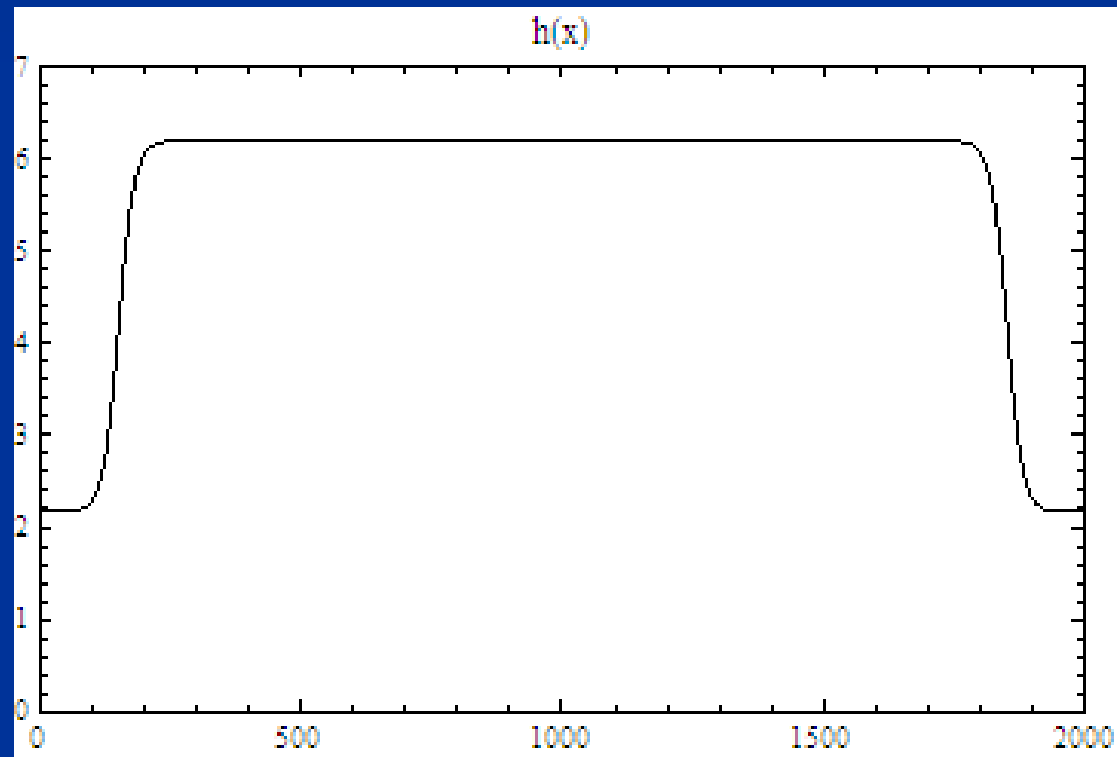


Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет





Пример эволюции слоя





Глава 5

Взаимодействие термокапиллярного и инжекционного механизма неустойчивостей на систему ЭГД-уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}(\nabla \mathbf{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + \frac{q \mathbf{E}}{\rho}, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T = \chi \Delta T, \quad \operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{q}{\varepsilon}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = q(\mathbf{v} + b \mathbf{E}).$$

$$z = h: \quad \phi_a = \phi = 0, \quad T = 0, \quad \varepsilon_a E_a - \varepsilon E = 0, \quad J_a = J.$$

$$z = 0: \quad \phi = -U, \quad T = \Theta.$$



Исследование эволюции бесконечно малых возмущений Линейная теория устойчивости

Под воздействием возмущений

$$z = h + \xi(x, t)$$

$$\vec{v}_0 = 0,$$

$$T_0 = \Theta \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right),$$

$$q_0 = -\left(\frac{\varepsilon J}{2b(z+A)}\right)^{-\frac{1}{2}},$$

$$\Phi_0 = -\Phi + \frac{2}{3} \left(\frac{2J}{b\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left((z+A)^{\frac{3}{2}} - A^{\frac{3}{2}}\right),$$

$$A^2 - \left(\frac{\varepsilon b \Phi^2}{2Jh^2}\right)^{\frac{1}{2}} A^{\frac{3}{2}} + Ah + \frac{h^2}{3} - \frac{3}{8} \left(\frac{\varepsilon b}{Jh}\right) \Phi^2 = 0.$$

$$(v_z, T, \phi, q, \xi) = (v(z), \Theta(z), \varphi(z), q(z), \zeta) \\ \times \exp[-\lambda t + ikx].$$



Линеаризованная система безразмерных уравнений

$$\lambda(v'' - k^2 v) = v^{IV} - 2k^2 v + k^4 v - Rak^2 \left(\frac{dq_0}{dz} \phi - \frac{d\phi_0}{dz} q \right),$$

$$-\lambda Pr \Theta = \Theta'' - k^2 \Theta + v,$$

$$-\lambda P_j q + \frac{dq_0}{dz} v + 2q_0 q - \left(\frac{d\phi_0}{dz} q' + \frac{dq_0}{dz} \varphi' \right) = 0,$$

$$\varphi'' - k^2 \varphi = -q,$$

$$z = 1: \quad v + Pr \lambda \zeta = 0, \quad \Theta' = 0,$$

$$\varphi + \zeta \frac{d\phi_0}{dz} = 0, \quad \varphi' + \zeta \frac{d^2 \phi_0}{dz^2} = 0,$$

$$v'' + k^2 v - k^2 Ma(\zeta - \Theta) = 0,$$

$$Cr \left[(3k - \lambda)v' - v''' + Rak^2 \left(q_0 \varphi + \frac{d\phi_0}{dz} \varphi' \right) \right]$$

$$= -k^2 \zeta (Bo + k^2),$$

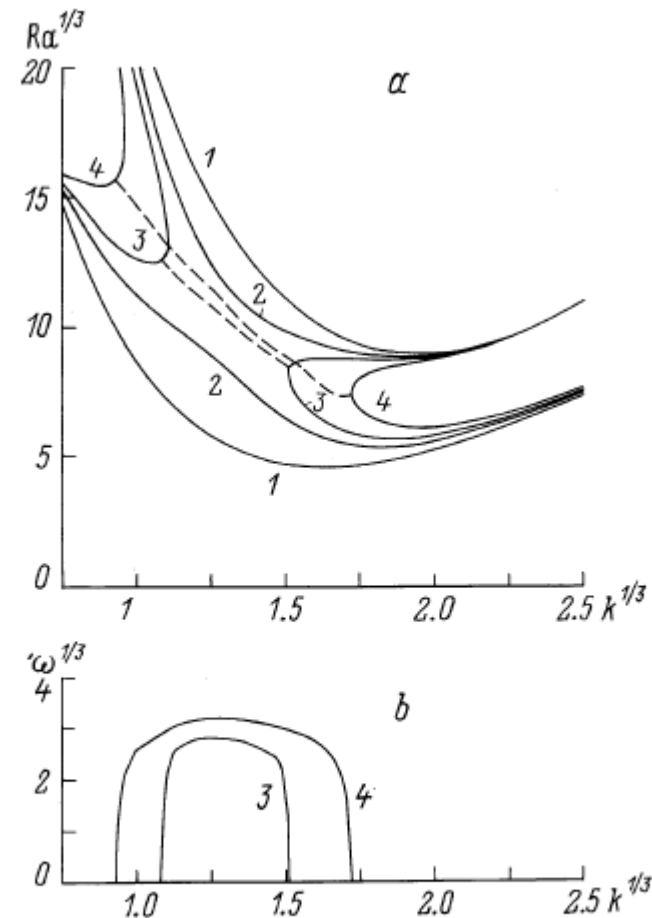
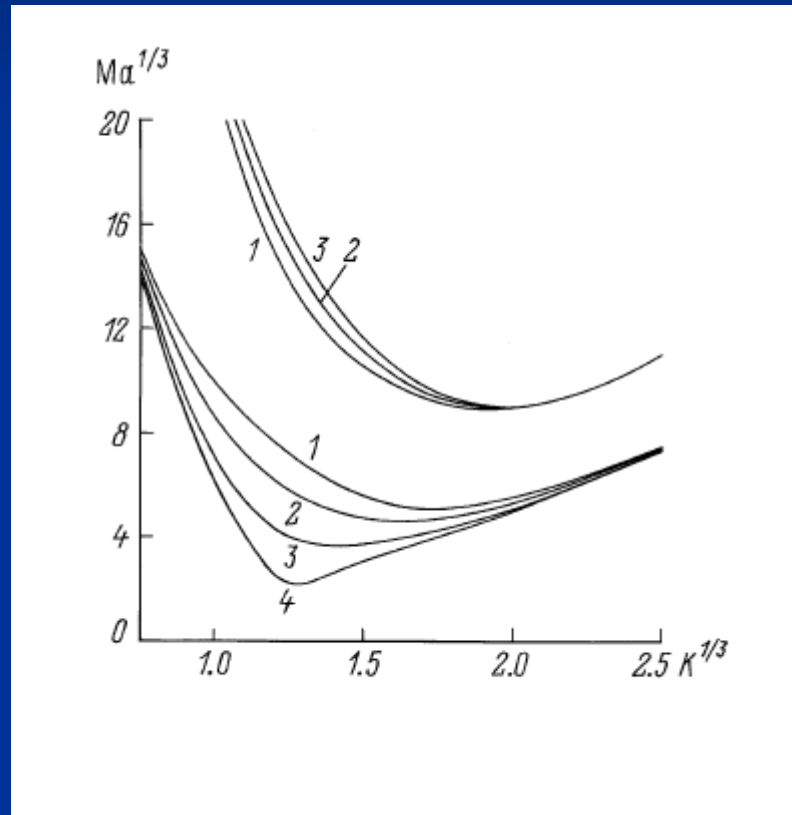
$$z = 0: \quad v = 0, \quad v' = 0, \quad \Theta = 0, \quad \varphi = 0.$$

$$Ra = \frac{\varepsilon U}{b \rho \nu}, \quad Ma = \frac{\sigma_1 \Theta h}{\rho \nu \chi}, \quad Pr = \frac{\nu}{\chi},$$

$$Bo = \frac{g \rho h^2}{\sigma_0}, \quad Cr = \frac{\rho \nu \chi}{\sigma_0 h}, \quad P_j = \frac{\nu}{b U}.$$



Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет



Нейтральные кривые устойчивости для двух нижних уровней монотонной и колебательной моды (а) и дисперсное соотношение $\omega(k)$ (b).



Научная новизна работы:

- теоретически и экспериментально исследовано поведение тонкого слоя испаряющейся тонкой пленки;
- определены параметры данной системы, для которой возникает пальцеобразная структура;
- изучено влияние термокапиллярного эффекта на динамику движения тонкого слоя полярной жидкости при испарении;
- исследовано поведение поверхности раздела «воздух-жидкость» для тонкой водяной пленки при наличии на поверхности растворимого сурфактанта;
- в линейной теории устойчивости получены и изучены уравнения электрогидродинамики при взаимодействии двух механизмов (термокапиллярного и инжекционного) неустойчивости.