

ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МИШЕНИ, ОБЛУЧАЕМОЙ ИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Н. Б. Волков¹ А.Я. Лейви^{1,2}, К. А. Талала², А. П. Яловец^{1,2}

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №06-08-00355), РФФИ-Урал (проект №07-08-96032) и Президиума УрО РАН в рамках целевой поддержки междисциплинарных исследований, проводимых совместно учеными УрО, СО и ДВО РАН, а также в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Исследования вещества в экстремальных условиях».

Характерные параметры пучков заряженных частиц

e^- , ионные пучки



Мишень

- Длительность импульса облучения 50нс÷250 мкс,
- Ускоряющее напряжение $U=10\div1000$ кВ,
- Плотность тока $J=10\div1500$ А/см²

Примеры электронных и ионных ускорителей

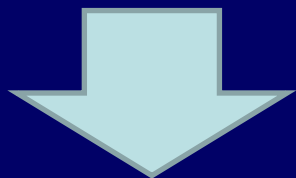
Параметры	GESA I *	GESA II *	ТЕМП **
Тип частиц	Электроны	Электроны	Ионы
Ускоряющее напряжение	50 - 150 кВ	200 - 400 кВ	300 кВ
Плотность мощности	≤ 2 МВт/см ²	≤ 6 МВт/см ²	
Плотность тока			40-150 А/см ²
Длительность импульса	4 - 40 мкс	5 - 250 мкс	50 нс

*- НИИЭФА (Санкт-Петербург)

** - НИИЯФ при ТПУ (Томск)

Наблюдаемые явления в мишени при ее облучении

e^- , ионные пучки



Мишень

1. Структурно-фазовые превращения
2. Образование систем трещин на поверхности мишени
3. Сглаживание микрорельефа поверхности мишени
4. Образование кратеров на поверхности мишени
5. Массоперенос вещества в мишени

Состояние проблемы

Экспериментальные исследования.

Образование кратеров на поверхности облучаемой мишени.

Rotshtein V.P., Markov A.B., Ivanov Yu.F., Shulov V.A., Engelko V.I., Kalin B.A., Mueller G., Remnev G. E., S. Yan, X.Y. Le, W.J. Zhao, Y.J. Shang, Wang Yugang, Raharjo P., Uemura K., Okada A., Uno Y. etc.

Сглаживание микрорельефа поверхности мишени в результате ее облучения.

Rotshtein V.P., Markov A.B., Raharjo P., Remnev G. E., Uemura K., Shulov V.A., Engelko V.I., Okada A., Uno Y. etc.

Массоперенос вещества в мишени при ее облучении.

Rotshtein V.P., Markov A.B., Shulov V.A., Engelko V.I., Remnev G. E., S. Yan, X.Y. Le, W.J. Zhao, Mueller G. etc.

Состояние проблемы

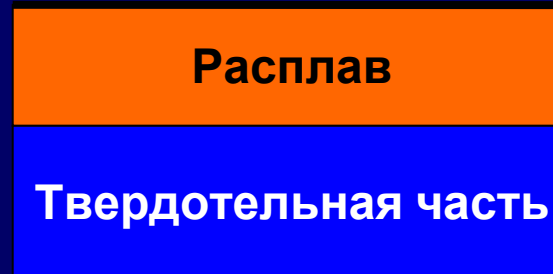
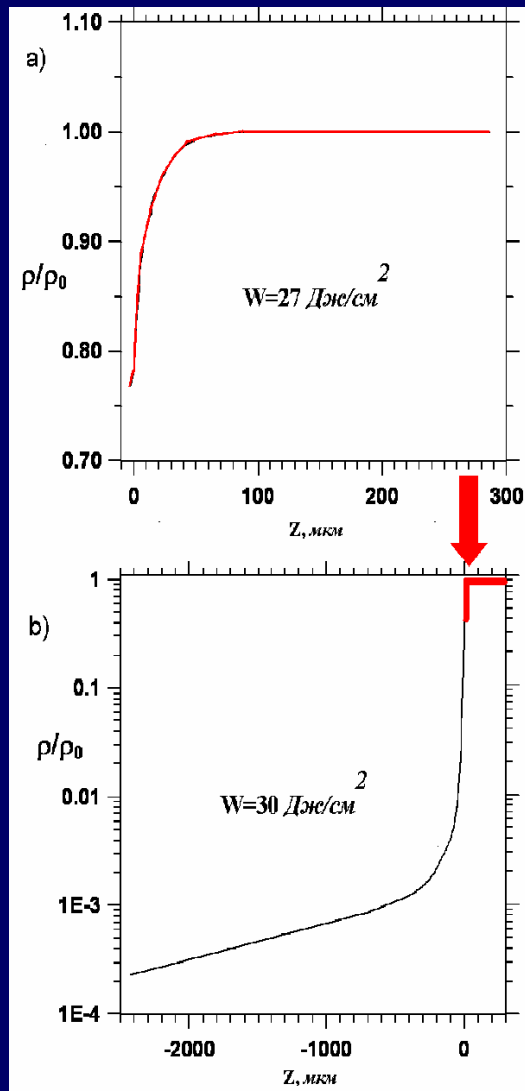
- Теоретические исследования.

- исследована динамика отдельного кратера (показано, что кратерообразование носит пороговый характер, является следствием развития неустойчивости Релея-Тейлора на поверхности облучаемой мишени)
- исследовано взаимодействие кратеров (показано, что существует доминирующий масштаб, определяющий размер кратеров. Доминирующий масштаб зависит от свойств материала и режима облучения).

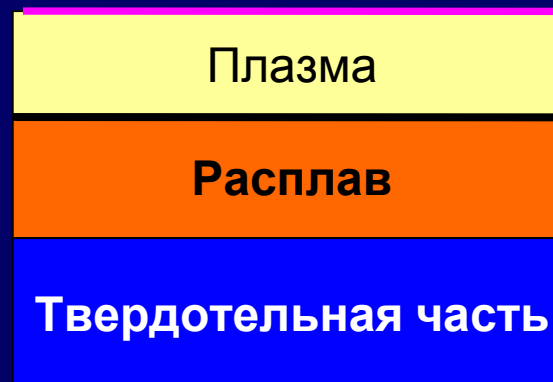
Задачи

- Механизмы массопереноса вещества в облучаемой мишени.
- Плотность распределения кратеров на поверхности облучаемого материала.
- Механизмы сглаживания микрорельефа облучаемой поверхности мишени.
- Роль инородных включений в процессах формирования кратеров на поверхности облучаемой мишени

Докритический и закритический режимы облучения



докритический
режим
 $v=1-10 \text{ м/с}$

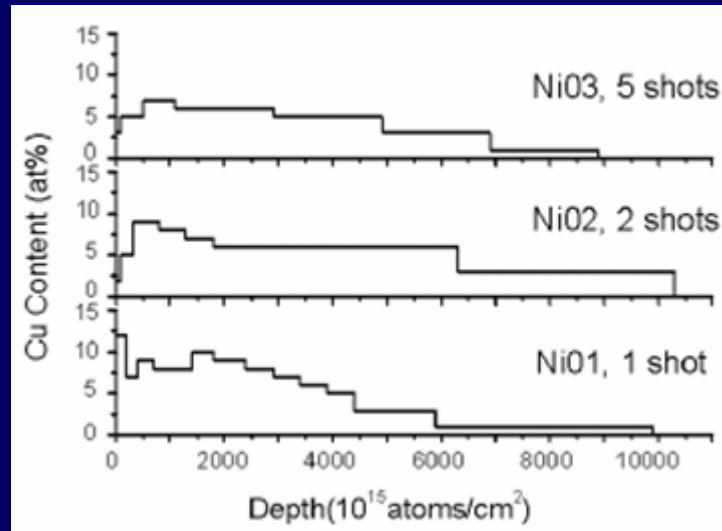


закритический
режим
 $v=100-1000 \text{ м/с}$

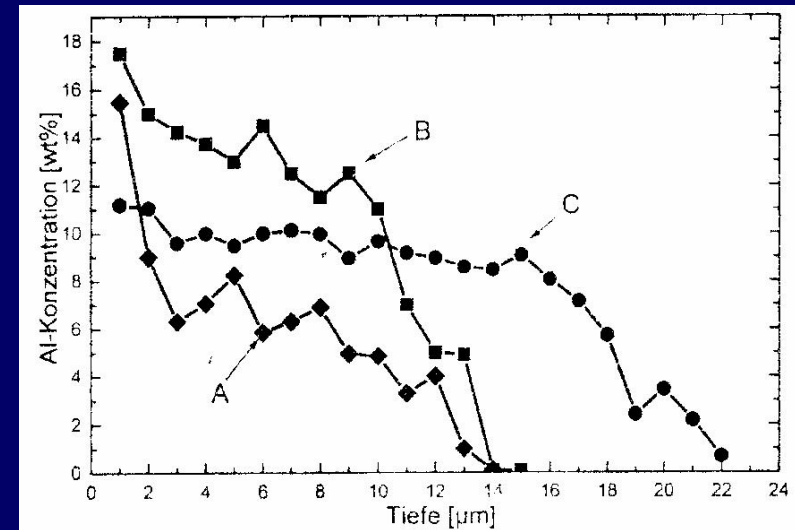
Распределение массовой плотности по глубине мишени на момент окончания импульса $T_e=115 \text{ кэВ}$, $\tau=30 \text{ мкс}$

Массоперенос вещества в облучаемой мишени

Depth distributions of Cu concentration in respective Cu/Ni samples*



AL concentration profile**

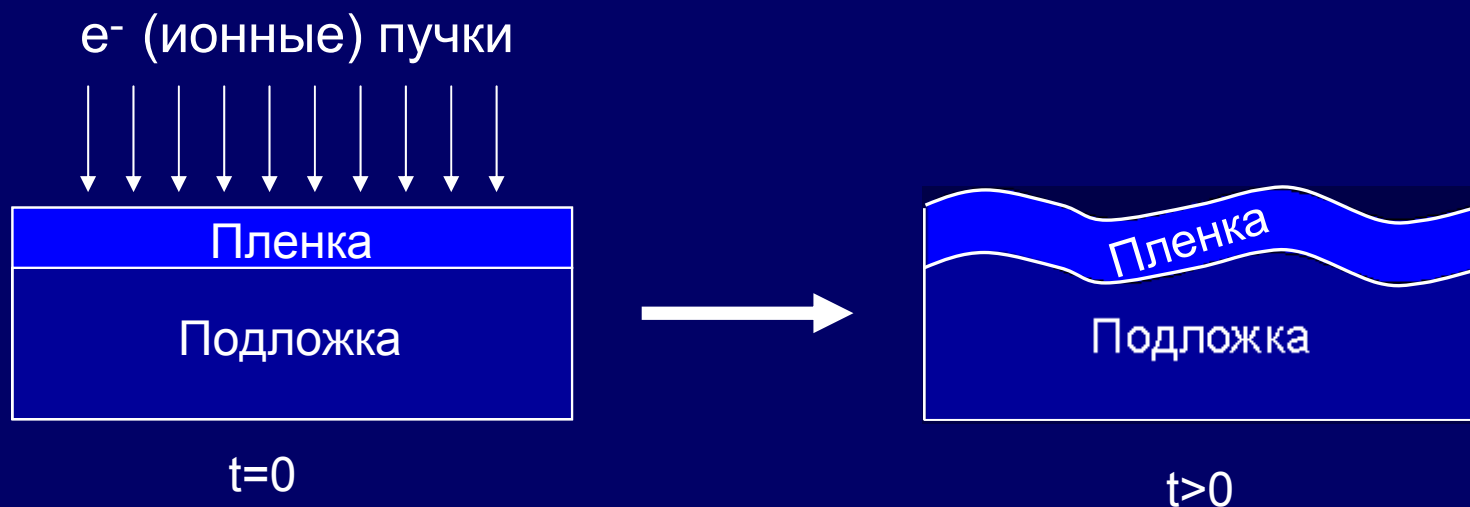


Глубина зоны перемешивания составляет 1-20 мкм

Intense Pulsed Ion Beam Mixing of Al, Ti, Ni, Cu Film/Substrate Systems S. Yan, X.Y. Le, W.J. Zhao, Y.J. Shang, Wang Yugang, Xue Jianming

** Mueller G., Bluhm H., Heinzl A., et al. // Proceedings 6th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, 2002, pp. 328-331.

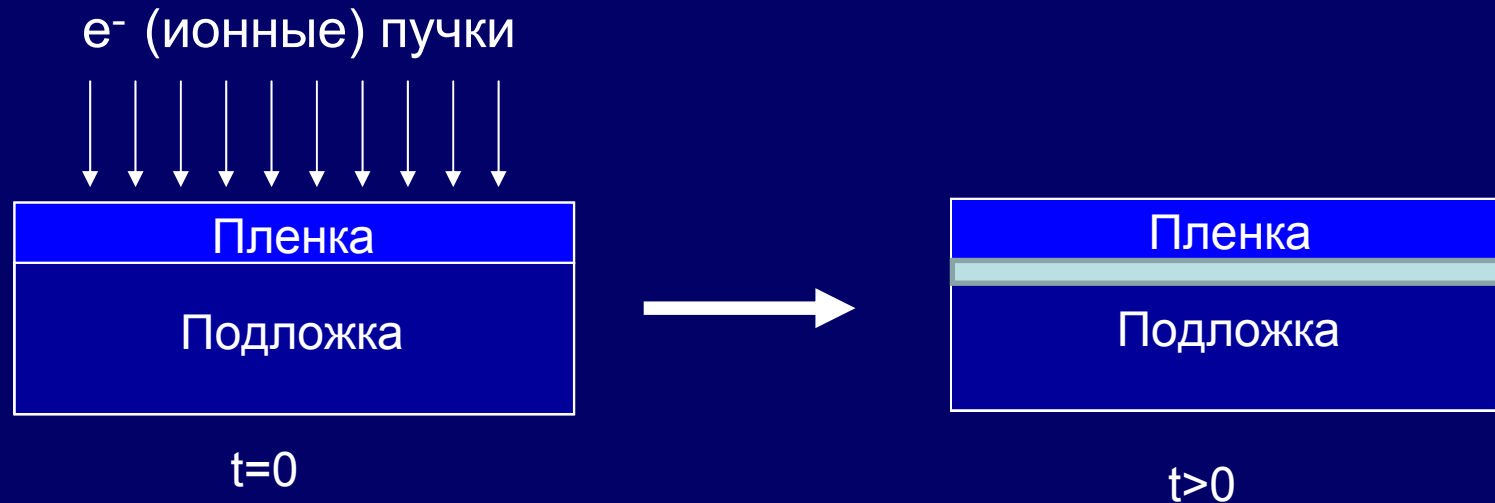
Массоперенос вещества в облучаемой мишени



Механизмы

1. Термостимулированная диффузия
2. Жидкофазное перемешивание
 - Неустойчивость Релея-Тейлора
 - Термокапиллярная конвекция

Термостимулированная диффузия



$$D = D_0 \exp\left(-\frac{W_0}{RT}\right)$$

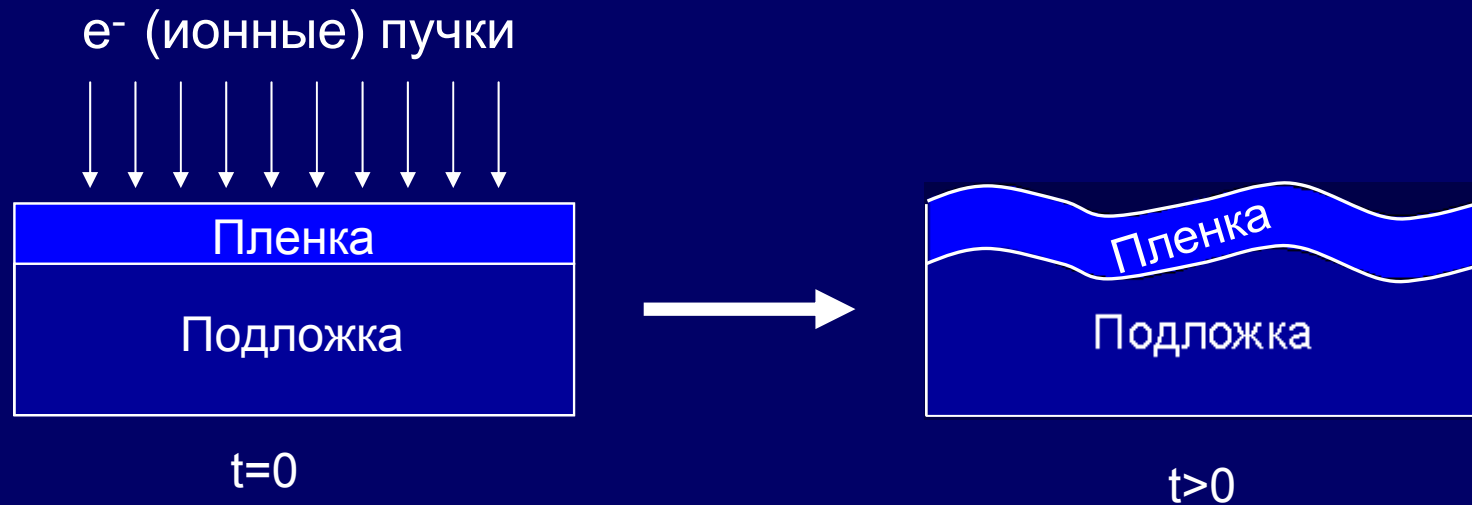
$$l \approx \sqrt{Dt}$$

$$D_0 \approx 3 \cdot 10^4 \text{ м}^2 / \text{с} \quad \text{Cu} \rightarrow \text{Fe}; \quad W_0 = 255.6 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{моль}; \quad T \approx 3000 \text{ К}$$

$$l \approx 0.1 \text{ мкм} \quad (t = 1 \text{ мкс}); \quad l \approx 0.367 \text{ мкм} \quad (t = 10 \text{ мкс})$$

Вывод: термостимулированная диффузия не объясняет массоперенос вещества на глубины порядка 10-20 мкм.

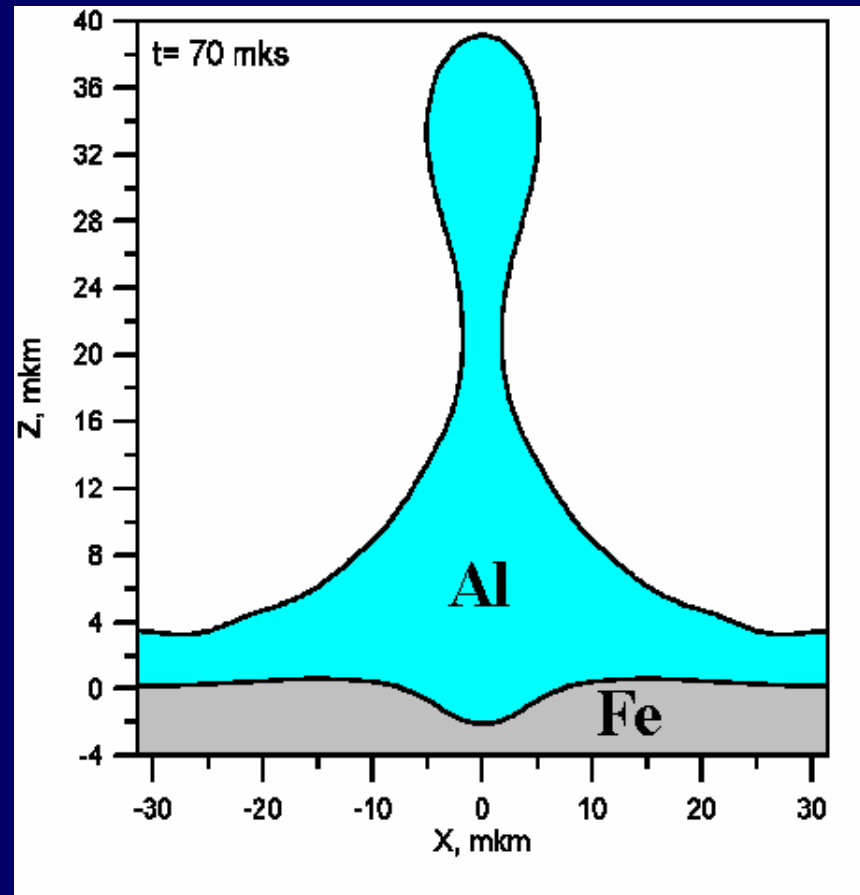
Неустойчивость Релея-Тейлора*



1. Ускорение облучаемой поверхности мишени $10^3 - 10^{11} \text{ м/с}^2$.
2. Во время облучения - неустойчивость Релея – Тейлора или гравитационные волны.
3. После окончания облучения- неустойчивость Рихмайера-Мешкова.
4. Время развития неустойчивостей ограничено временем существования расплава

*Волков Н.Б., Лейви А.Я., А.Е. Майер, К.А. Талала, А.П. Яловец. // XXII Международная конференция. Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество, Эльбрус, 2000.

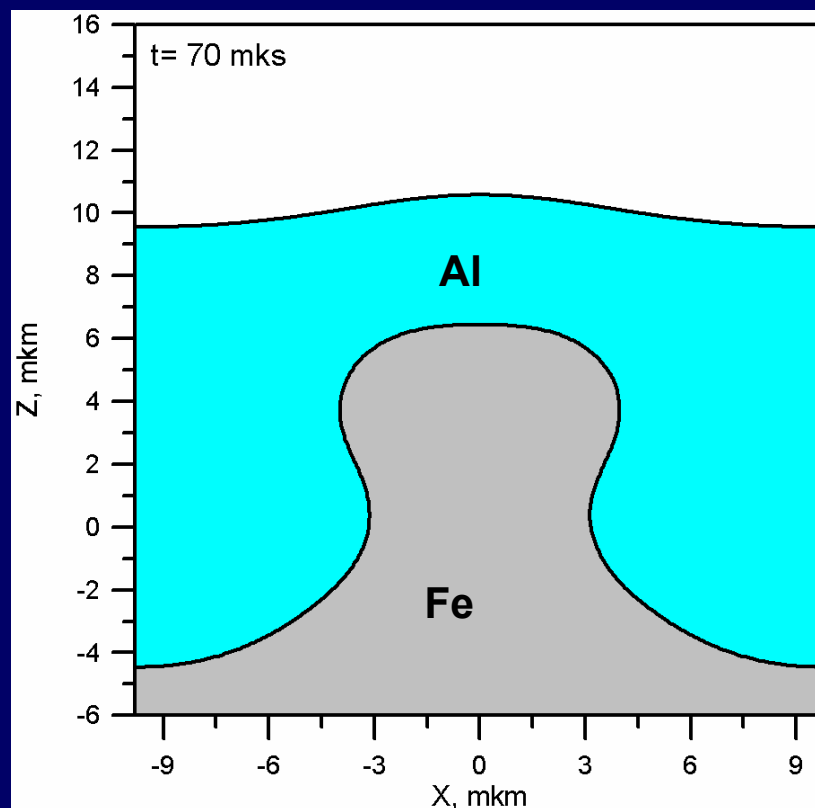
Роль неустойчивости Релея-Тейлора типа в динамике системы пленка- подложка



$$a_0 = 1 \text{ мкм}, \lambda = 62 \text{ мкм}$$

Облучение системы Al/Fe толщина Al 10 мкм электронным пучком с параметрами: $\tau = 10 \text{ мкс}$, $T_e = 20 \text{ кэВ}$, $W = 100 \text{ Дж/см}^2$.

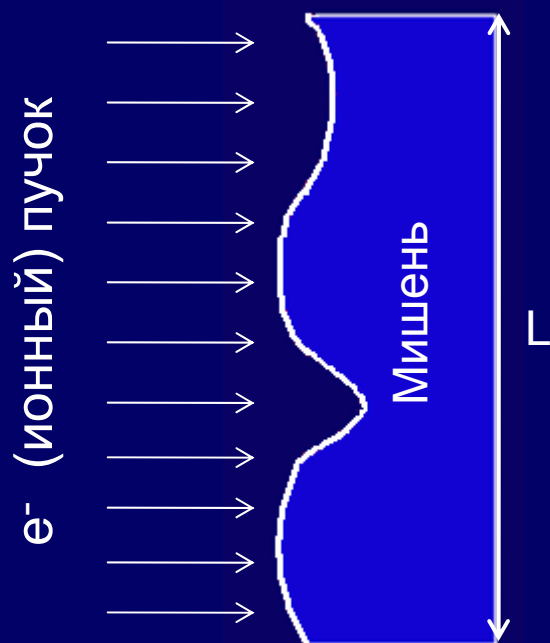
Роль неустойчивости Релея-Тейлора типа в динамике системы пленка- подложка



$$a_0 = 1 \text{ мкм}, \lambda = 20 \text{ мкм}$$

Облучение системы Al/Fe толщина AL 10 мкм электронным пучком с параметрами: $\tau = 10$ мкс, $T_e = 20$ кэВ, $W = 80$ Дж/см².

Термокапиллярная конвекция в объеме облучаемой мишени



1. До облучения мишень находится в твердом состоянии.
2. При облучении приповерхностные слои мишени переходят из твердого состояния в жидкое.

3. На поверхности облучаемой мишени возникают температурные возмущения за счет микрорельефа поверхности (т.к. плотность энерговыведения в объеме мишени зависит от угла падения частиц на мишень). В результате в мишени возникают течения имеющие не нулевую вихревую составляющую скорости.

Конвективная неустойчивость

Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости, М. «Наука», 1972

А.В. Гетлин. Формирование пространственных структур конвекции // УФН, т.161, сентябрь 1991, стр. 1-80

Р. Х. Зейтунян. Проблема термокапиллярной неустойчивости Бенара-Марангони // УФН, Т. 168 №3, март 1998, с 259-286

Z.Zeng, H. Mizuseki, K. Shimamura, K. Higashino, T. Fukuda. Marangoni convection in model of floating zone under microgravity // Journal of crystal growth 229, 2001, pp. 601-604.

Л. Х. Ингель. Об условиях конвективной неустойчивости в верхнем слое жидкого раствора // ЖТФ, 2001, т. 71, вып. 1, с. 128-130.

A. Yu. Gelfgat, A. Rubini, P.Z. Bar-Yoseph, A. Solan. On the three-dimensional instability of thermocapillary convection in arbitrarily heated floating zones in microgravity environment// FDMP, V.1, №1, 2005, pp 21-31

Система уравнений, описывающая течение вещества в облучаемой мишени

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0$$

Уравнение непрерывности

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial}{\partial x_k} v_i \right) = \frac{\partial (\sigma_{ik} + 2\eta v_{ik})}{\partial x_k} + f_i$$

Уравнение движения

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + v_k \frac{\partial}{\partial x_k} U \right) = \sigma_{ik} v_{ik} + 2\eta v_{ik}^2 + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + D_b$$

Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial S_{ik}}{\partial t} + v_k \frac{\partial S_{ik}}{\partial x_k} = 2\mu \left(v_{ik} - \frac{1}{3} v_{\ell\ell} \delta_{ik} \right)$$

Девизатор напряжений

$$P = P(\rho, T)$$

Уравнение состояния

$$\sigma_{ik} = -P\delta_{ik} + S_{ik}$$

f_i - внешние массовые силы, D_b - функция энерговыделения, μ - модуль сдвига, η - сдвиговая вязкость, q_i - тепловой поток.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + v_k \frac{\partial n}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} D_n \frac{\partial n}{\partial x_k}, \text{ где } n \text{ концентрация примеси, } D_n(T) \text{ - коэффициент диффузии.}$$

Разделение поля скоростей

Представим поле скоростей в виде: $\vec{v} = \vec{v}^p + \vec{v}^w$; $\vec{v}^p = \nabla \varphi$; $\vec{v}^w = [\nabla \vec{\psi}]$.

Обозначим: $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v}^p \nabla)$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v_i^p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i^w)$$

Уравнение непрерывности

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial (\sigma_{ik} + 2\eta v_{ik})}{\partial x_k} + f_i - \rho v_k^w \frac{\partial}{\partial x_k} v_i$$

Уравнение движения

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \sigma_{ik} v_{ik} + 2\eta v_{ik}^2 + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + D_b - \left(\rho v_i^w \cdot \frac{\partial U}{\partial x_i} \right)$$

Закон сохранения энергии

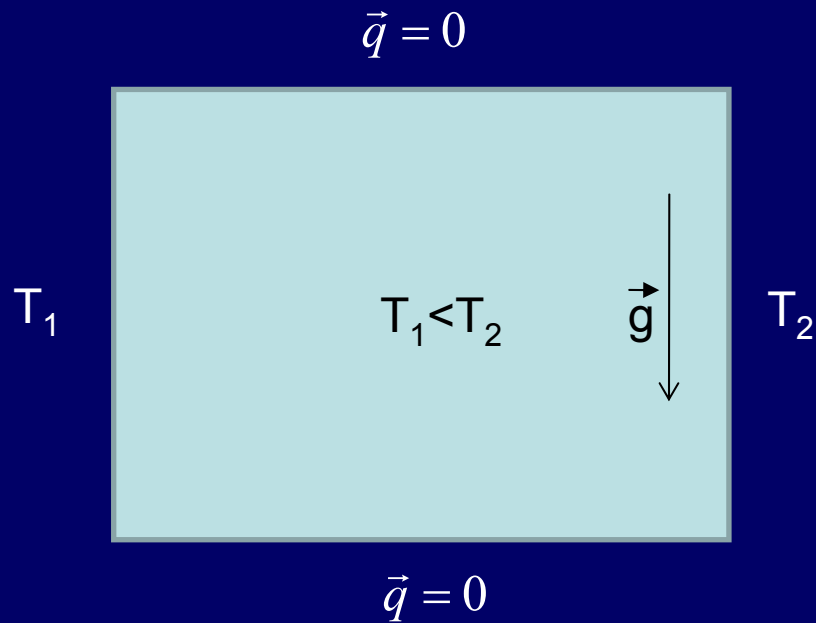
$$\frac{DS_{ik}}{Dt} = 2\mu \left(v_{ik} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \delta_{ik} \right) - v_j^w \frac{\partial S_{ik}}{\partial x_j}$$

Девиатор напряжений

$$\frac{Dn}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} D_n \frac{\partial n}{\partial x_k} - v_k^w \frac{\partial n}{\partial x_k}$$

Уравнение для концентрации примеси

Тестовые расчеты



Безразмерные параметры:

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T h^3}{\nu \chi}$$

число Релея

$$Ma = \frac{\alpha \Delta T h}{\eta \chi}$$

число Марангони

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}$$

число Прандтля

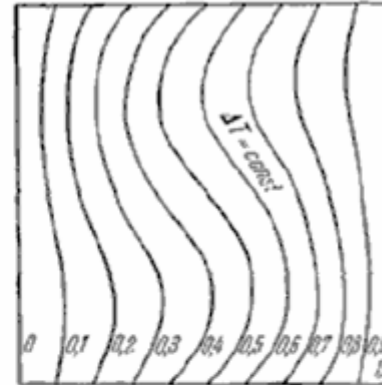
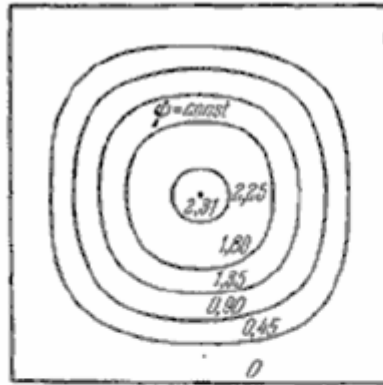
β - коэффициент объемного расширения, g - ускорение свободного падения, ΔT - характерный перепад температур, h - характерный линейный размер области, ν - коэффициент кинематической вязкости, χ - температуропроводность, α - температурный коэффициент поверхностного натяжения, η - динамическая вязкость

2 D – геометрия, начальное возмущение в виде точечного вихря, граничные условия – условия прилипания, $Pr = 1$

Тестовые расчеты

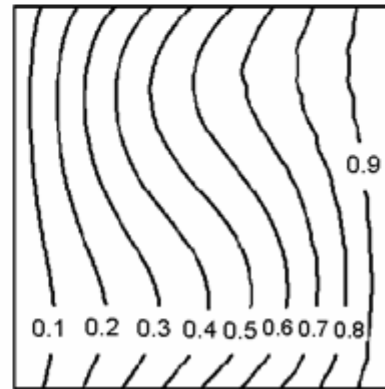
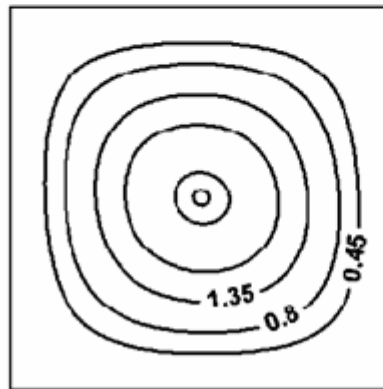
Линии тока

Поля температур



Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М, 1973, с. 505-509.

а)



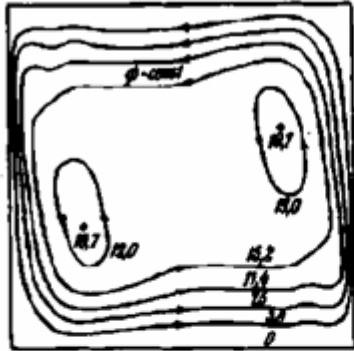
Наши расчеты

б)

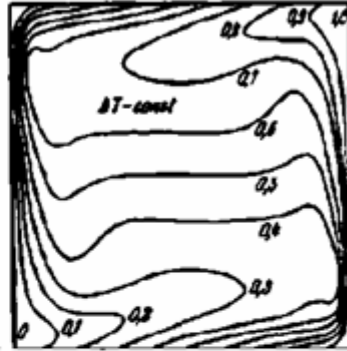
$Ra=2000$

Тестовые расчеты

Линии тока

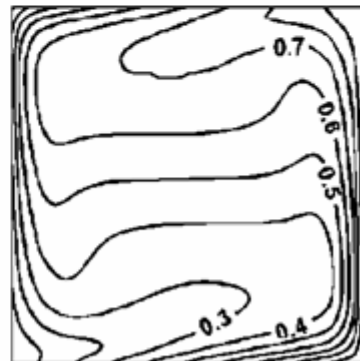
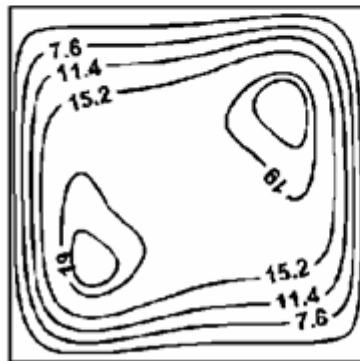


Поля температур



Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М, 1973, с. 505-509.

а)

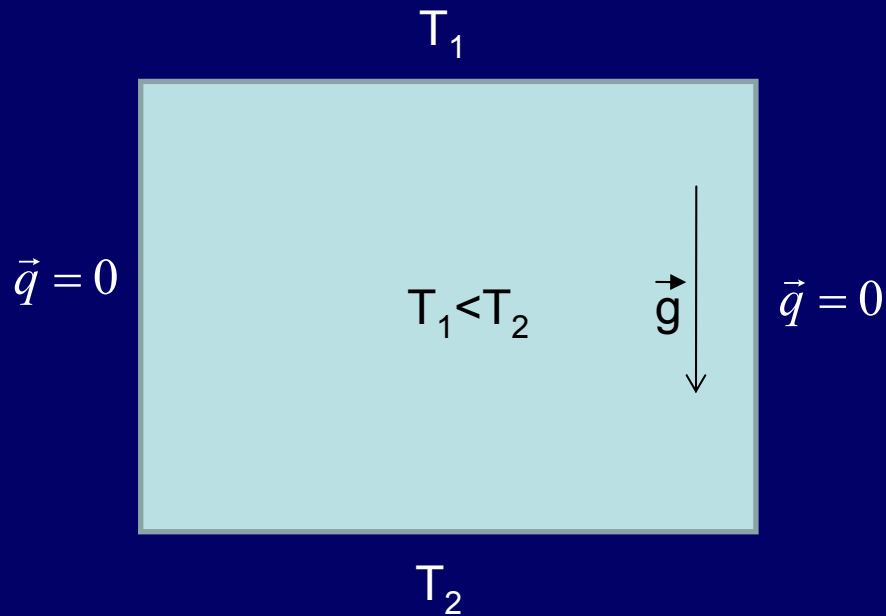


Наши расчеты

б)

$Ra=400000$

Тестовые расчеты



Безразмерные параметры:

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T h^3}{\nu \chi}$$

число Релея

$$Ma = \frac{\alpha \Delta T h}{\eta \chi}$$

число Марангони

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}$$

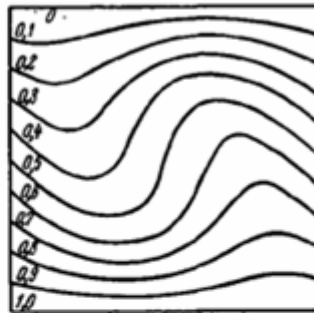
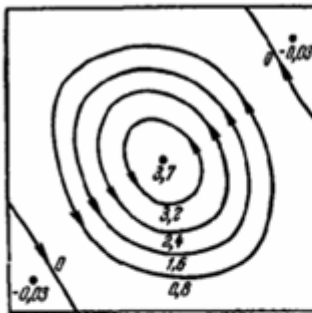
число Прандтля

β - коэффициент объемного расширения, g - ускорение свободного падения, ΔT - характерный перепад температур, h - характерный линейный размер области, ν - коэффициент кинематической вязкости, χ - температуропроводность, α - температурный коэффициент поверхностного натяжения, η - динамическая вязкость

2 D – геометрия, начальное возмущение в виде точечного вихря, граничные условия – условия прилипания, $Pr = 1$

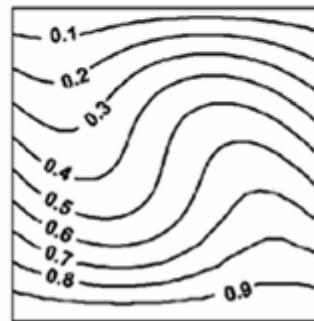
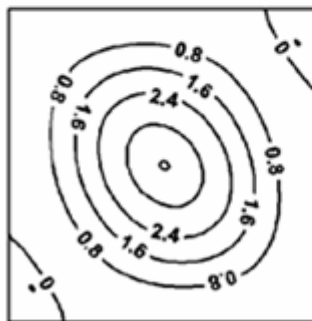
Тестовые расчеты

Линии тока Поля температур



Г.З.Гершуни, Е.М.Жуховицкий.
Конвективная неустойчивость
несжимаемой жидкости,
М, "Наука", 1972, с. 385.

а)



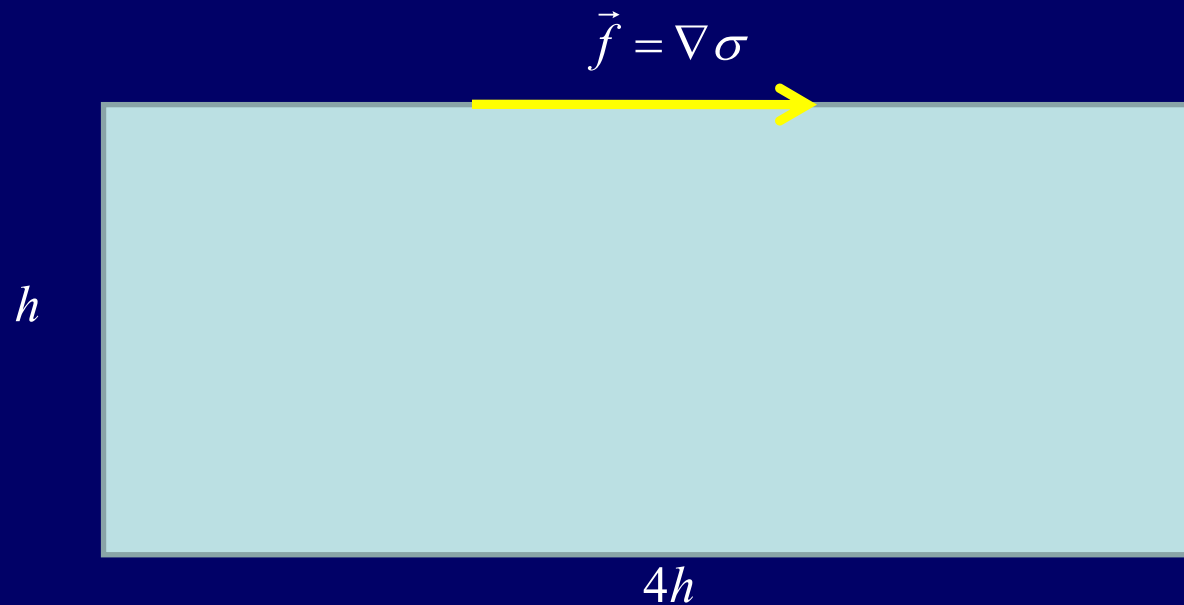
Наши расчеты

б)

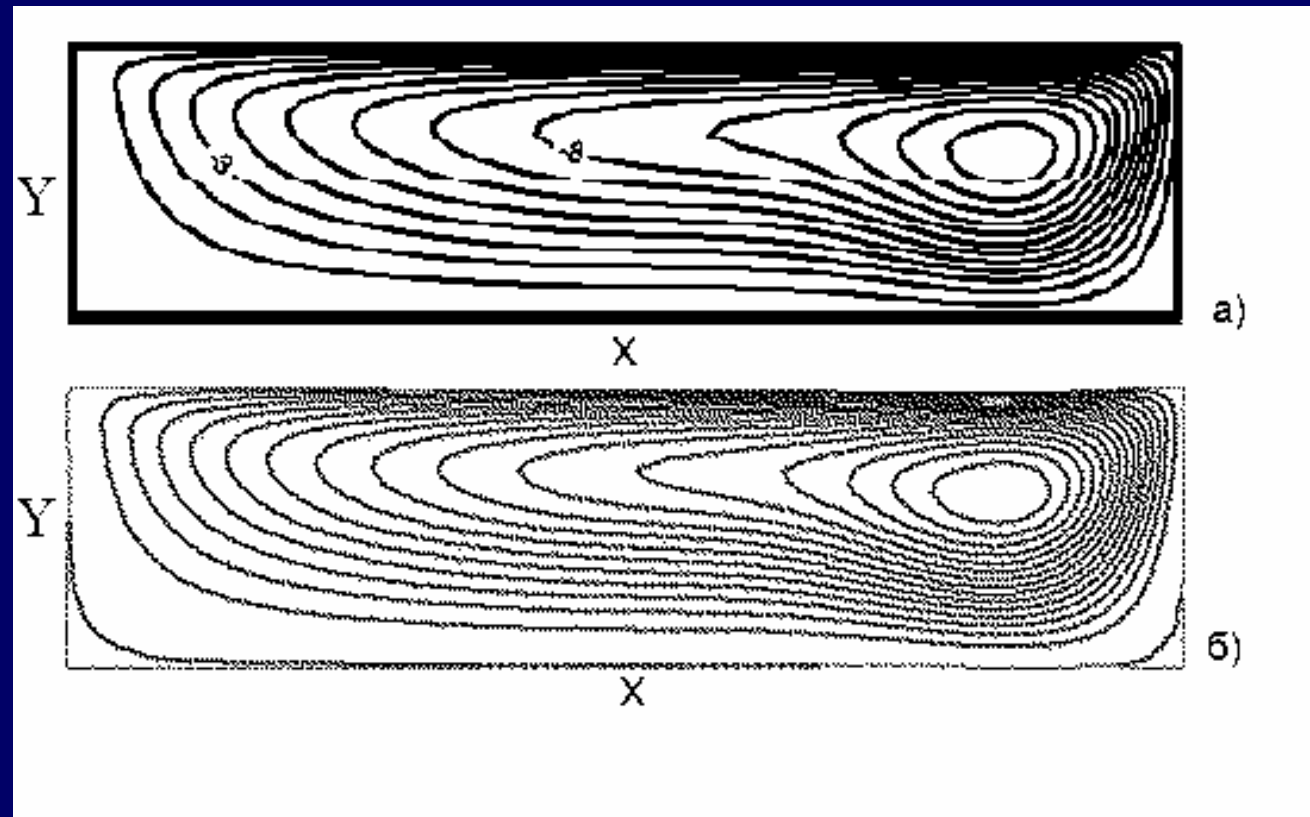
$Ra = 8000$

Тестовые расчеты

2 D – геометрия, жесткие боковые стенки и нижняя граница, вдоль поверхности задано линейное распределение температуры $\sigma = \sigma(T)$



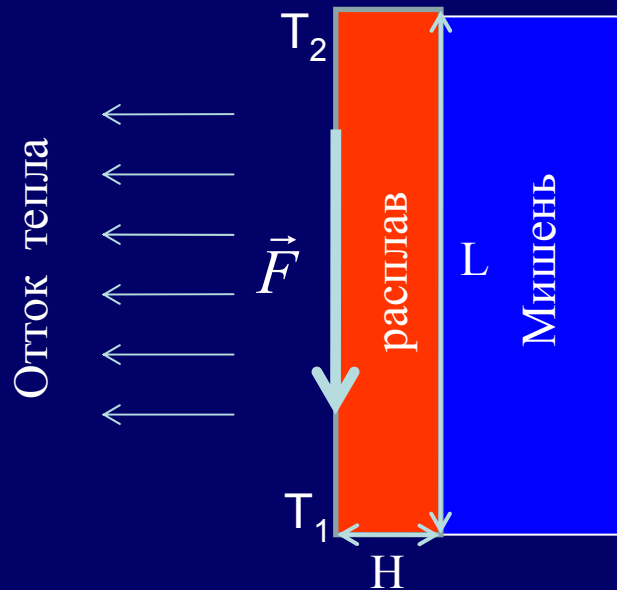
Тестовые расчеты



$Ma=20$. а) Рассчитанные поля функции тока (линии тока) б) *

* Т.Г. Елизарова. Математические модели и численные методы в динамике газа и жидкости. Подходы, основанные на системах квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений. Лекции, М, Физический факультет МГУ, 2005 г., с. 221.

Термокапиллярная конвекция в облучаемой мишени



Исследуемое вещество - железо.

Граничные условия:

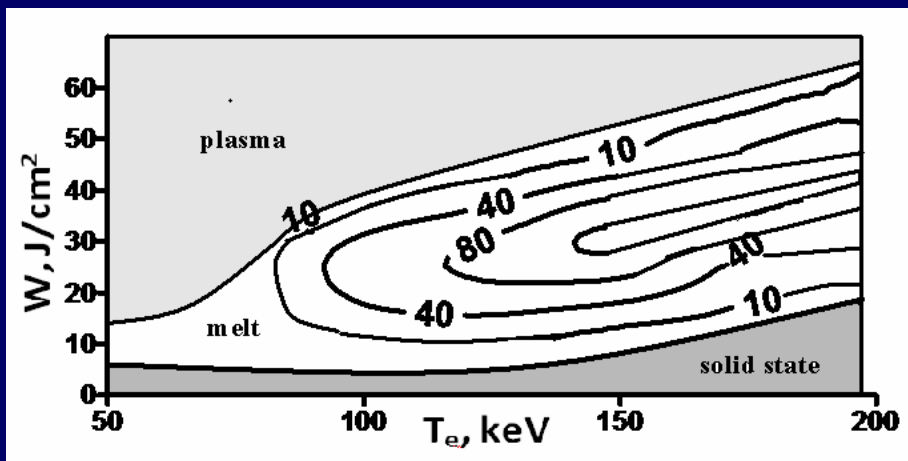
1. На контактной границе условие прилипания
2. На поверхности мишени $(\vec{v}^w \vec{n}) = 0$
3. Боковые стенки адиабатические

Термокапиллярный механизм $\sigma = \sigma(T)$, $T_1 < T_2$

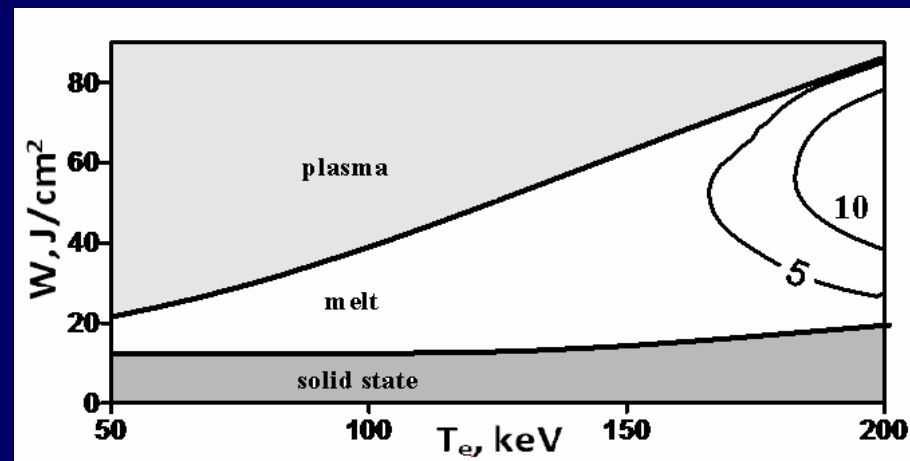
Необходимые условия:

Наличие свободной границы, температура которой ниже, чем в приповерхностных слоях мишени.

Изолинии чисел Марангони для железной мишени, облучаемой пучком монохроматических электронов энергии на плоскости «плотность энергии пучка W – энергия электронов T_e »



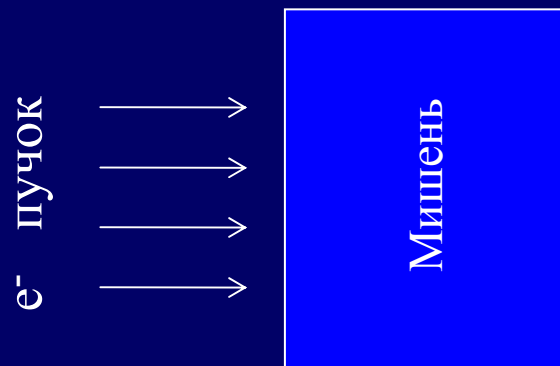
$\tau = 1$ мкс



$\tau = 30$ мкс

Вывод: Для существования конвекции необходимо, чтобы длительность облучения была меньше характерного времени теплопроводности.

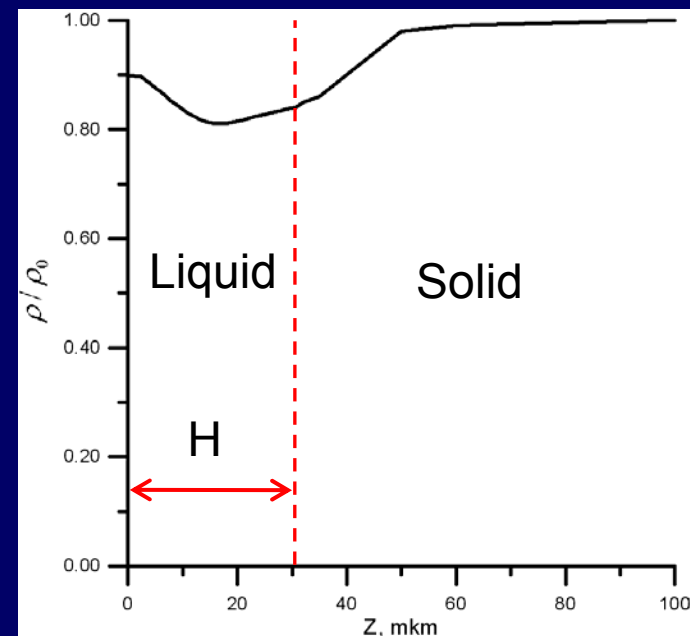
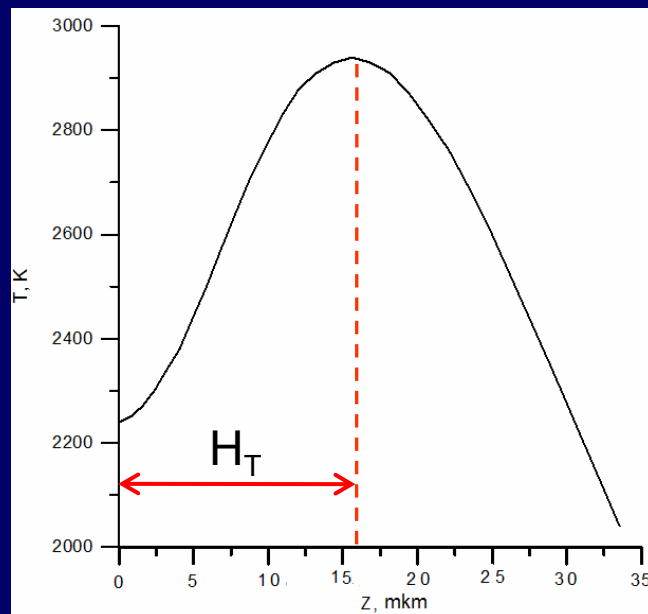
Воздействие на мишень (FE) электронным пучком.



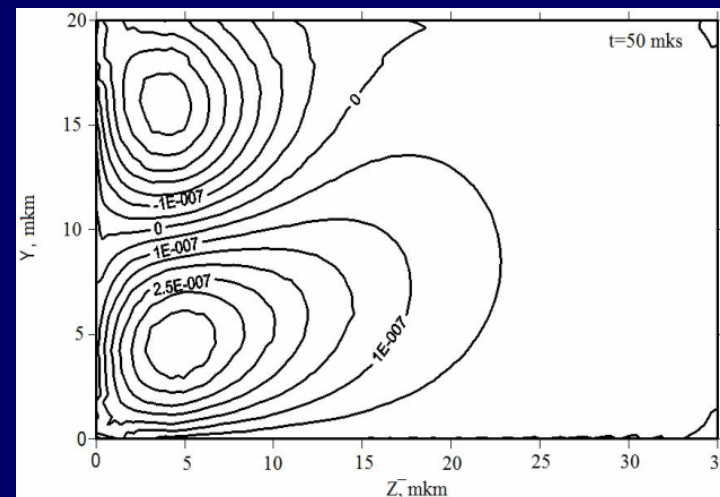
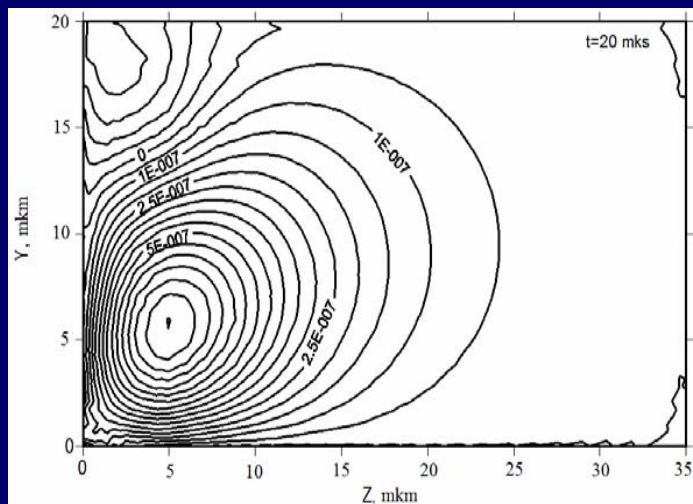
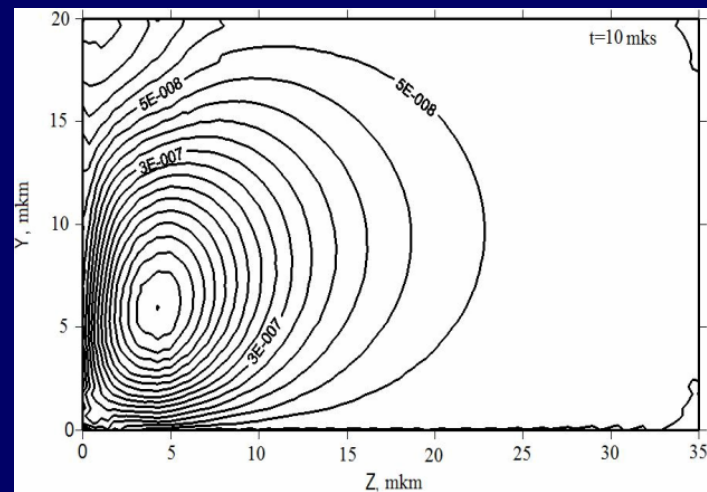
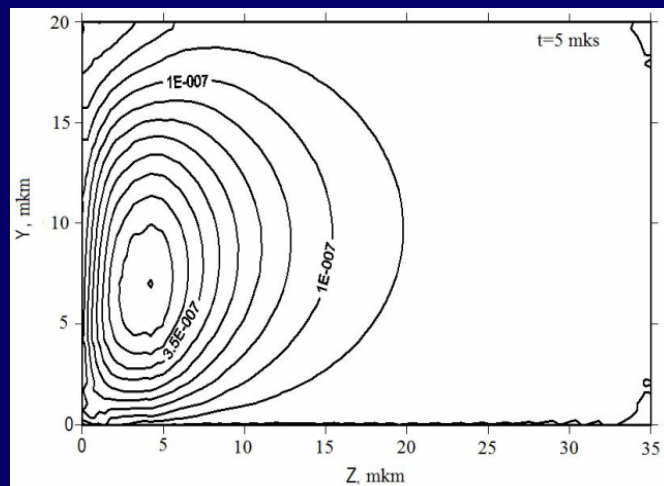
Параметры облучения

- Длительность импульса облучения: $t=1$ мкс
- Энергия частиц: $U=200$ кэВ.
- Плотность тока: $J=250$ А/см²

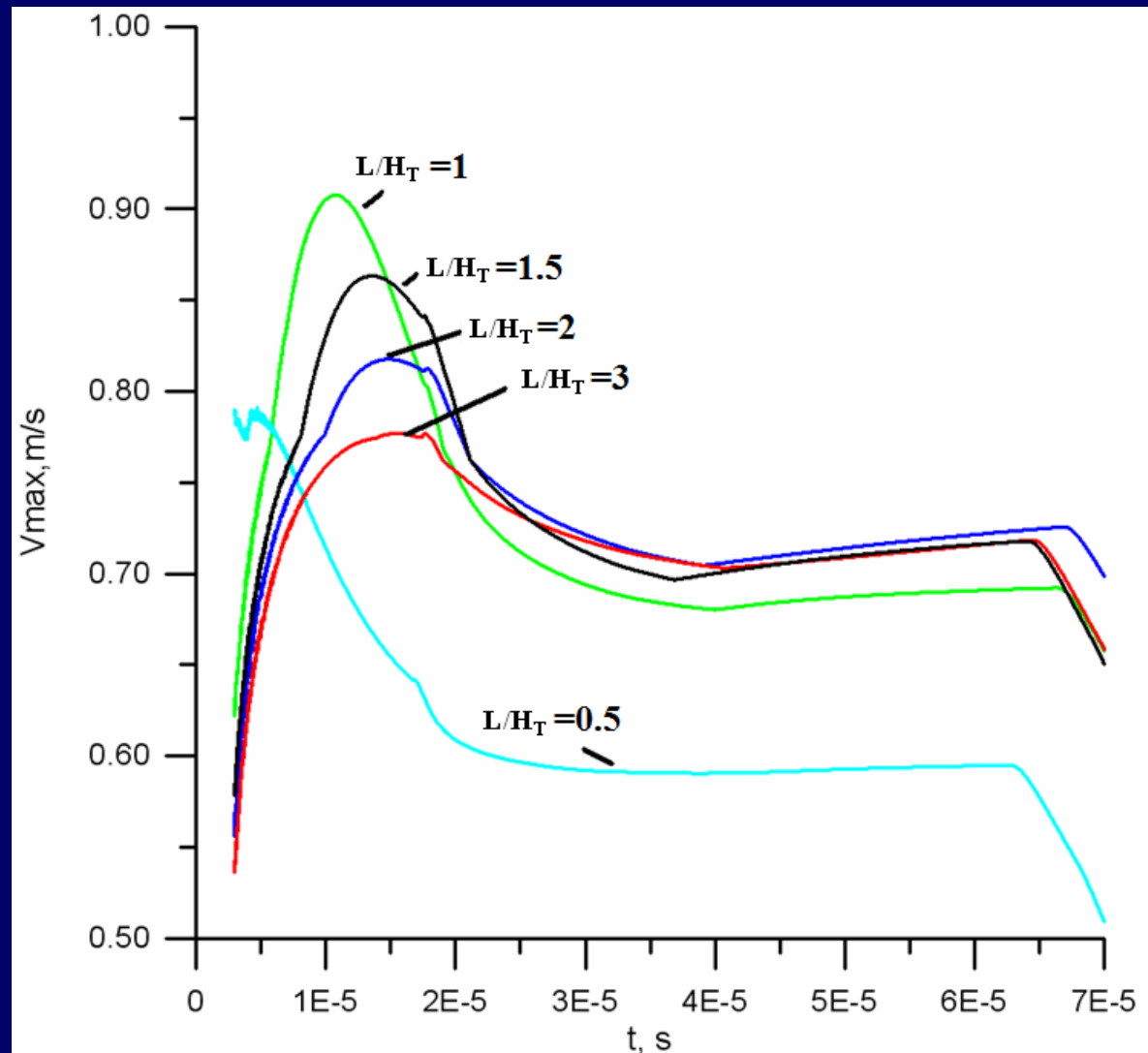
Распределение температуры и плотности по глубине мишени, на момент окончания облучения.



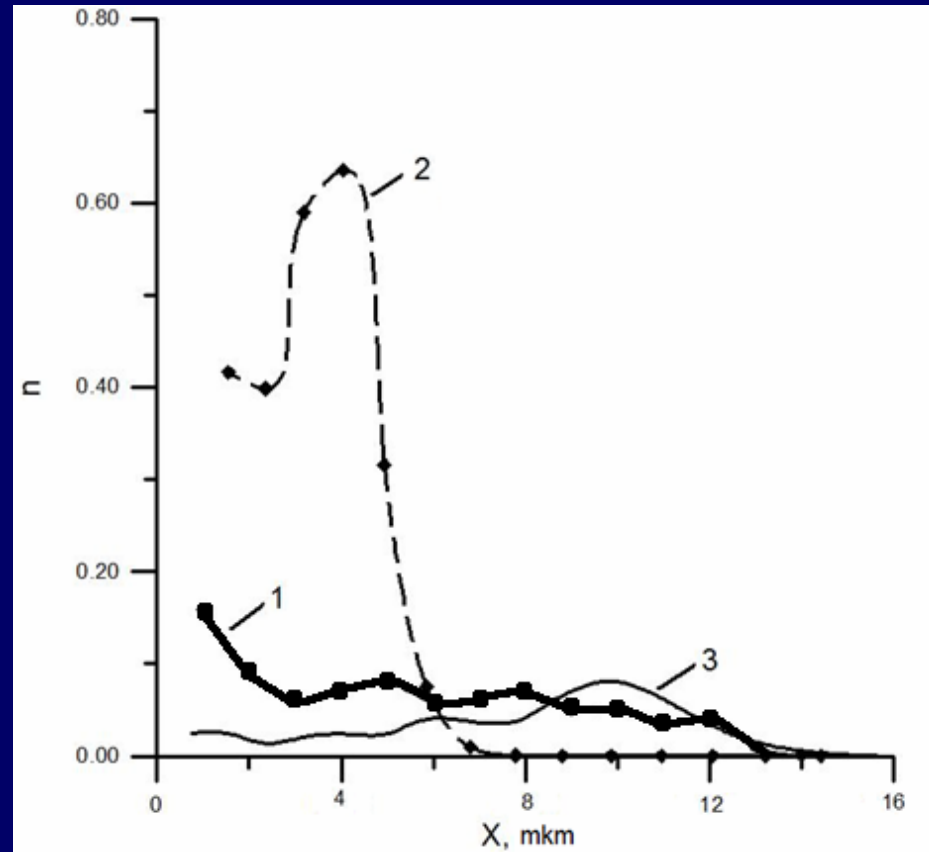
Линии тока в различные моменты времени для длины волны
начального возмущения $L=20$ мкм



Зависимость максимума скорости среды от времени для различных L/H_T . $H_T \approx 20$ мкм.



Распределение концентрации примеси по глубине мишени на момент начала кристаллизации. Кривая 1 – эксперимент *, кривые 2 ($L/H_T=0.5$) и 3 ($L/H_T=3$) - наши расчеты.



* G. Mueller, H. Bluhm, A. Heinzl, G. Schumacher, D. Strauss, A. Weisenburger, F. Zimmermann, V. Engelko, V. Shulov, N. Notchovnaia// Proceedings 6th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, 2002, pp. 328-331.

Выводы

- Показано, что неустойчивость Релея-Тейлора может привести к перемешиванию приповерхностных слоев только в случае возмущений поверхности мишени, соответствующих определенному диапазону волновых чисел, который в свою очередь определяется режимом облучения.
- Разработан метод моделирования сложных течений в объеме облучаемой мишени. Данный метод позволил сочетать в себе достоинства лагранжевого подхода к описанию свободной границы и эйлерова подхода для описания вихревых течений. В данном методе учтены: вязкость, теплопроводность, поверхностное натяжение, термодиффузия.
- Показано, что за счет развития термокапиллярной конвекции толщина зоны перемешивания может достигать порядка 10-20 мкм.