

# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОДНОВОЛОКОННЫХ МНОГОМОДОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

Витрик Олег Борисович

Институт автоматизации и процессов управления ДВО  
РАН,

Владивосток

2011



# Мотивация





# «Умные» объекты (Smart structure)

Внешнее  
физическое  
воздействие



Smart  
Structure



«Разумный»  
сигнал

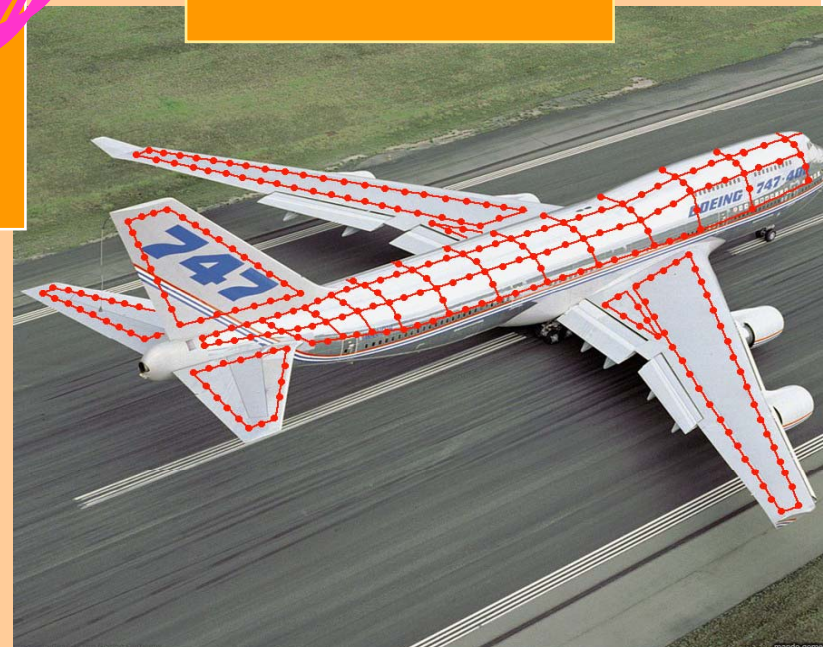
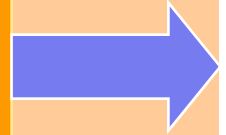




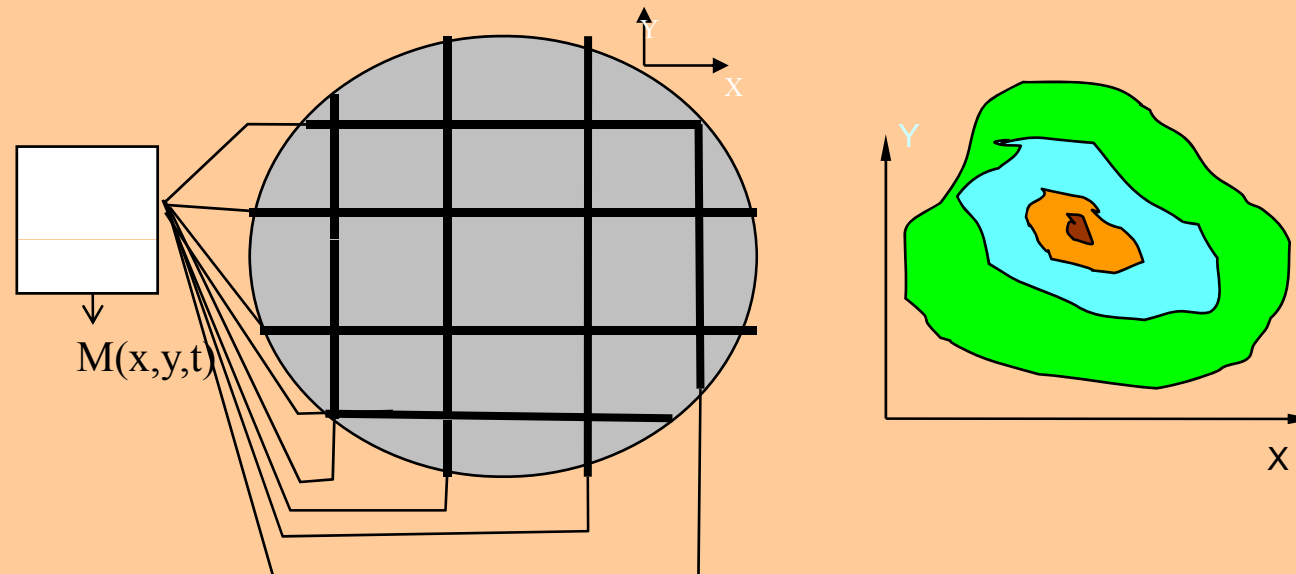
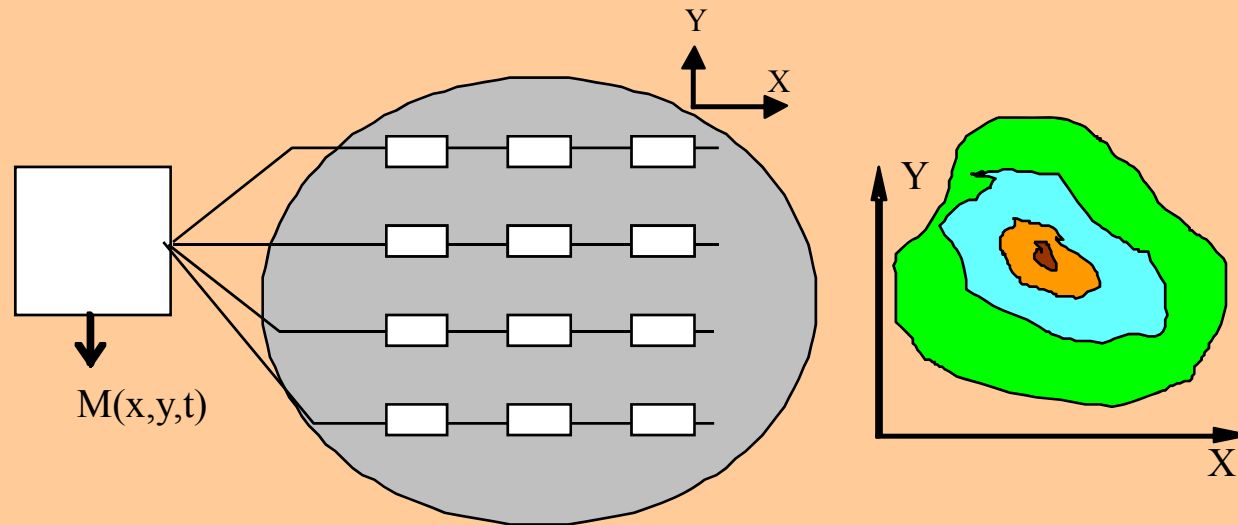
# Smart structure

Нервная система

Мозг  
(Компьютер)

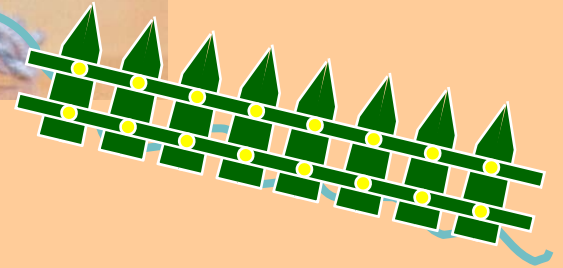
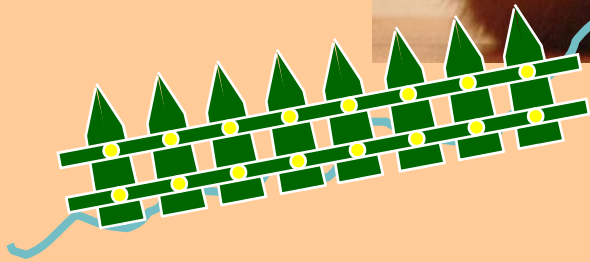


# Точечный или интегрирующий?

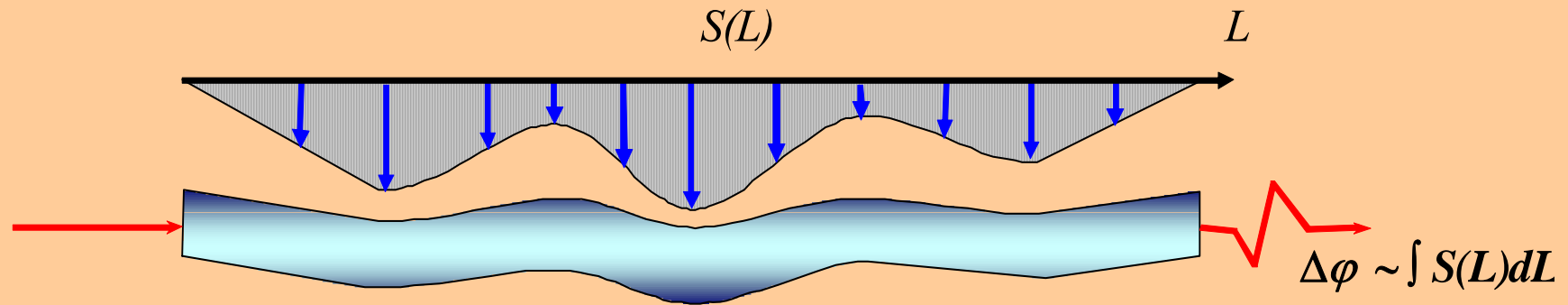




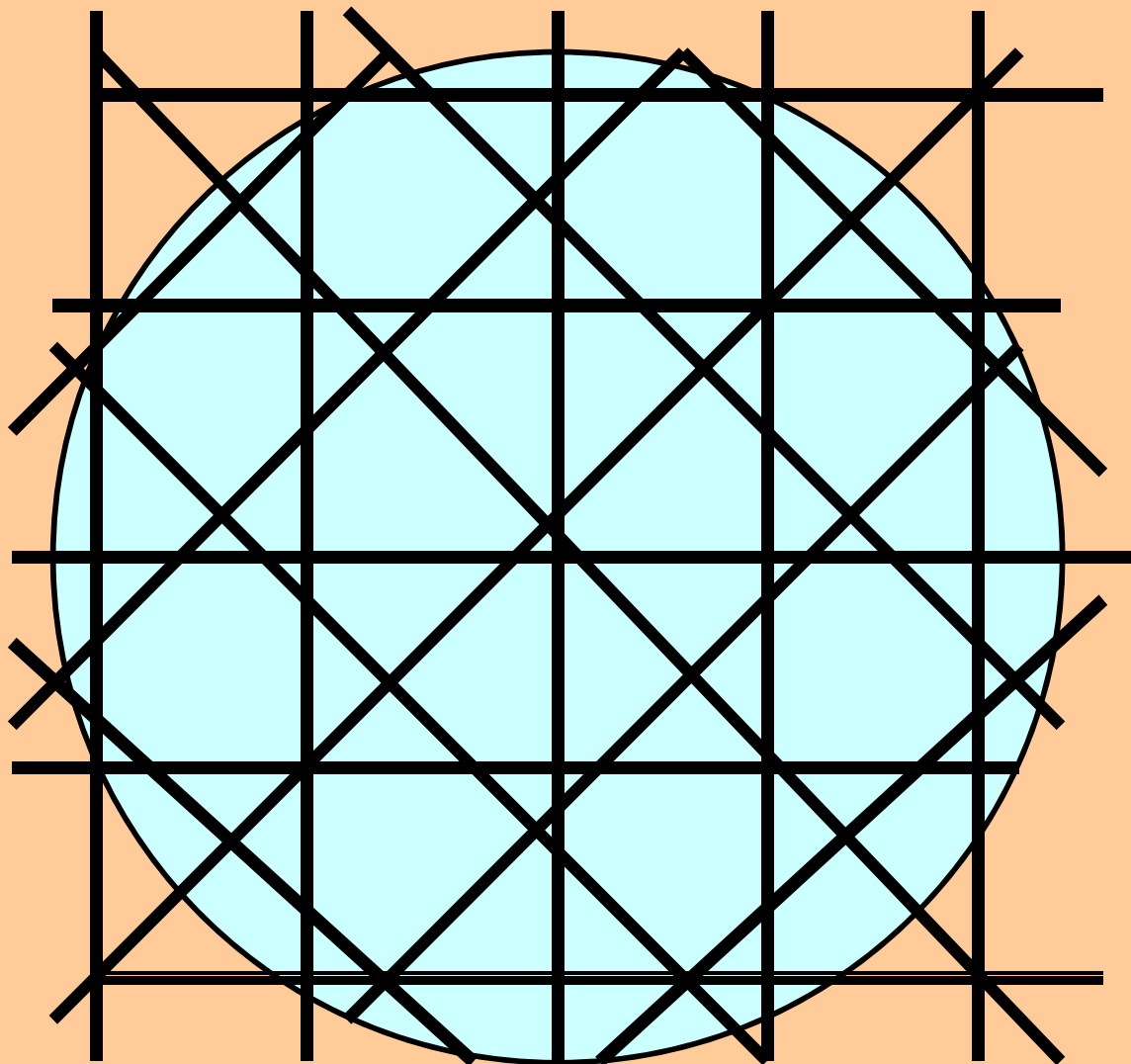




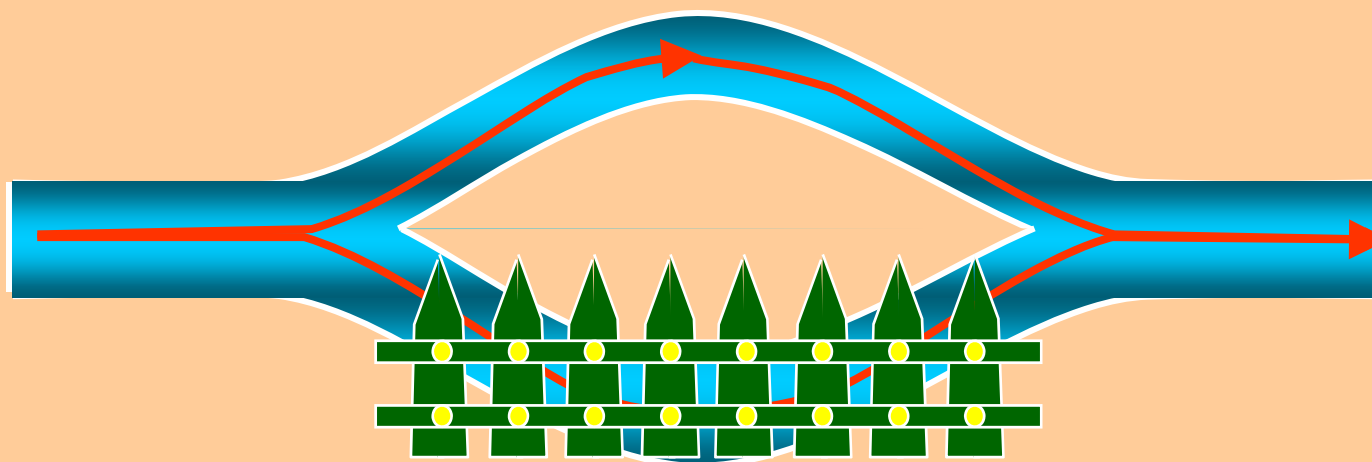
# Интегрирующий волоконно-оптический датчик



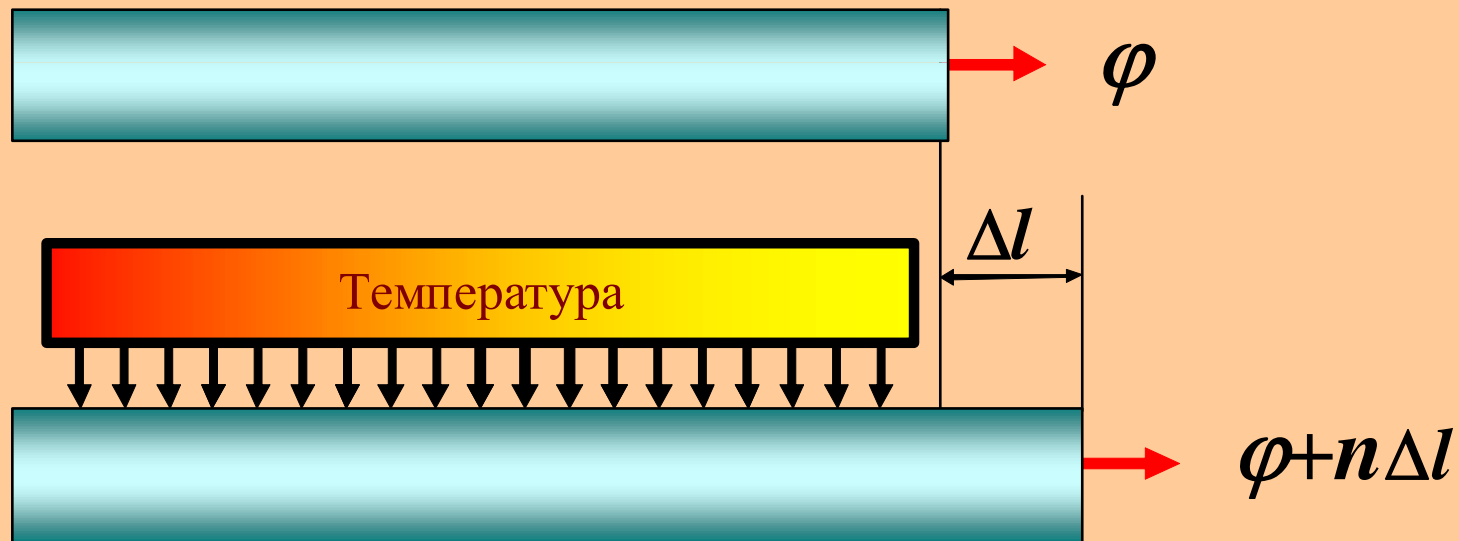
# Волоконно-оптическая измерительная система томографического типа



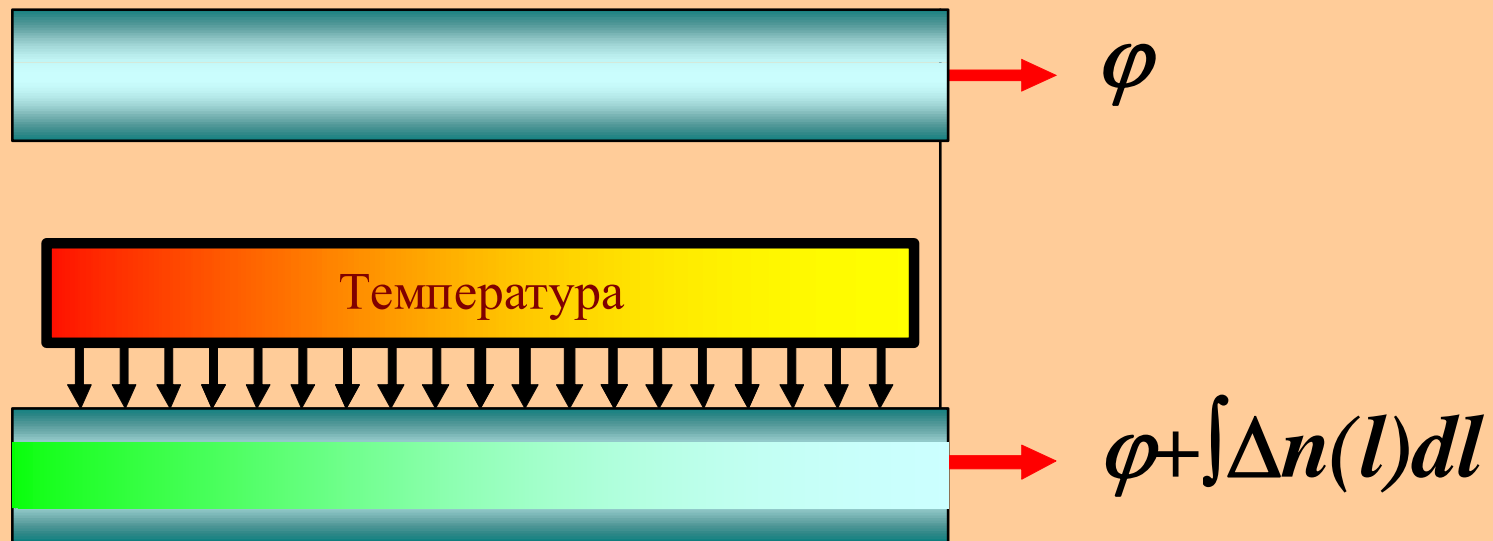
# Какой интерферометр выбрать?



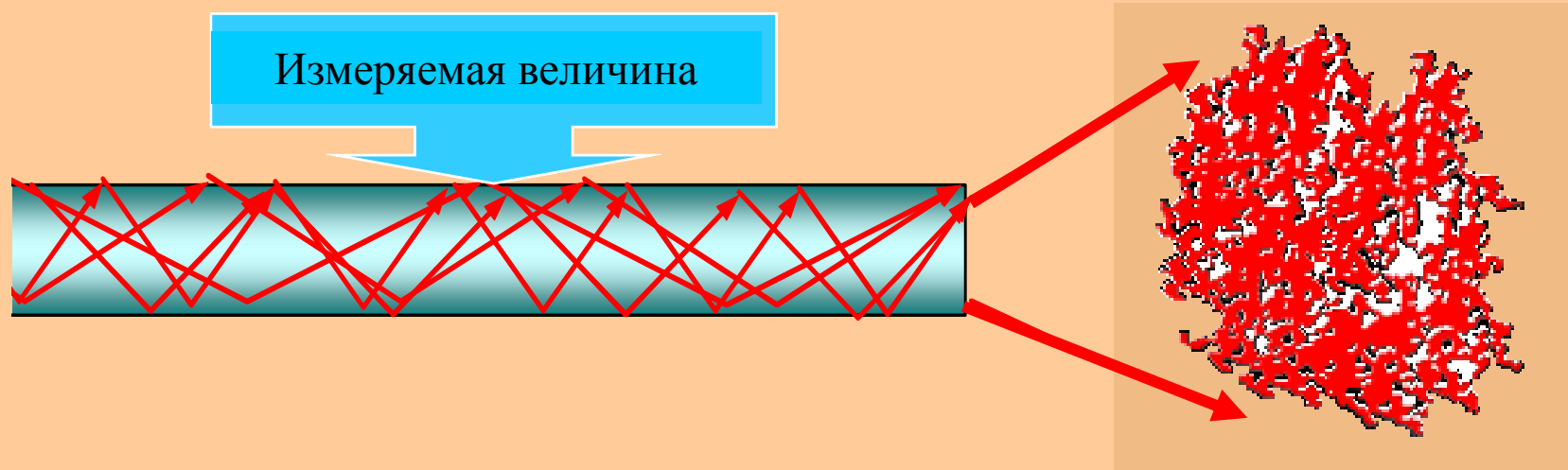
# Какой интерферометр выбрать?



# Какой интерферометр выбрать?



# Какой интерферометр выбрать?

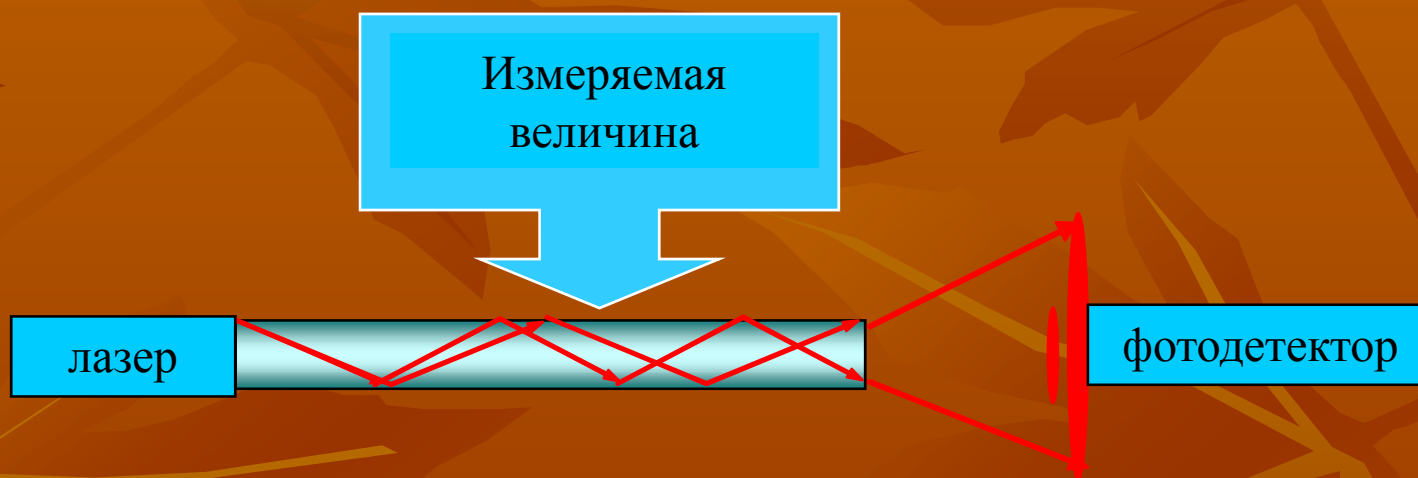


# **Преимущества протяженных интегрирующих датчиков на одноволоконных многомодовых интерферометрах.**

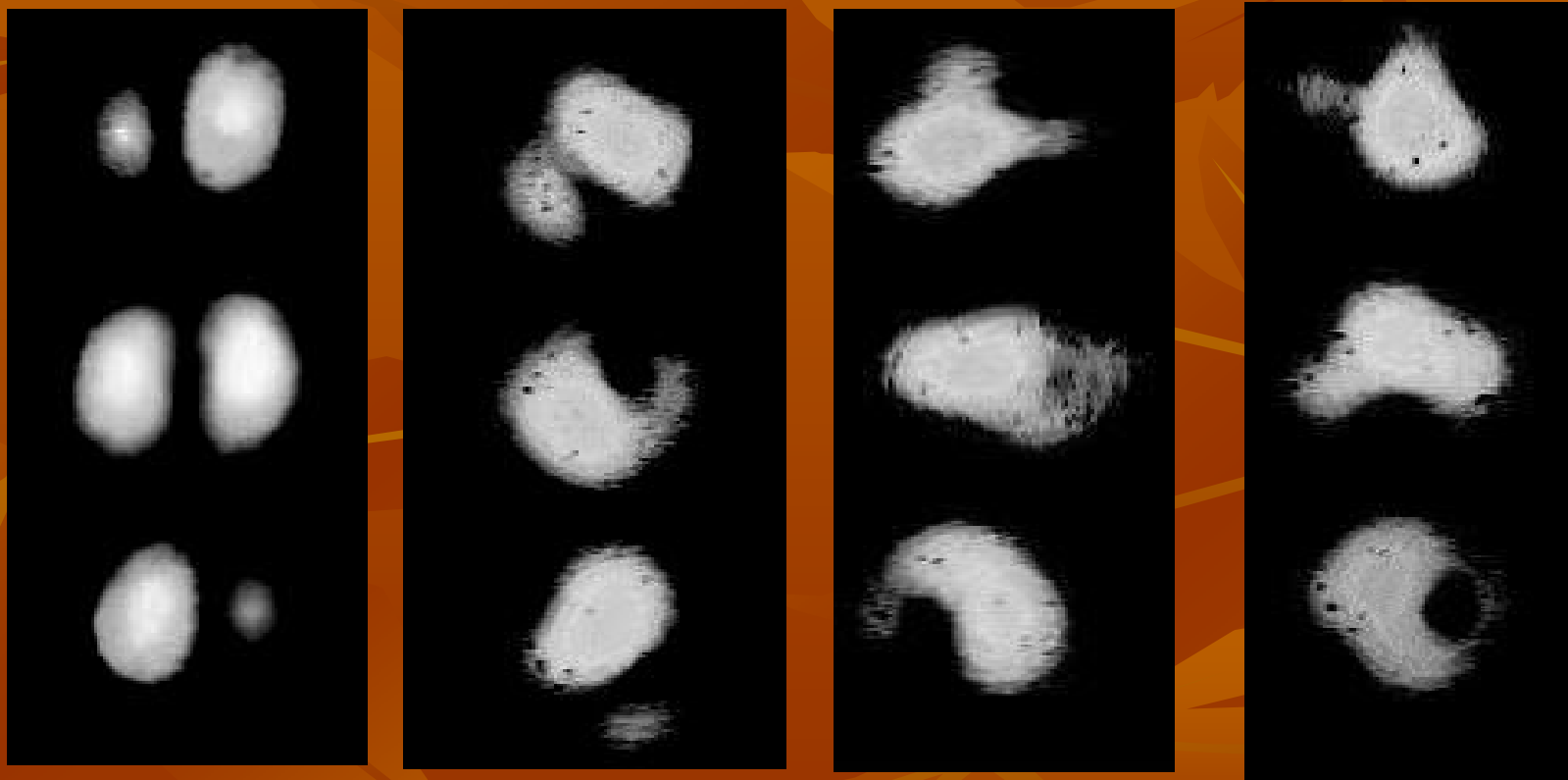
- **Предельная простота оптической схемы.**
- **Отсутствие опорного канала.**
- **Низкая цена**
- **Повышенная устойчивость к неконтролируемому изменению температуры.**
- **Высокая чувствительность к деформационным воздействиям.**
- **Возможность создания многоканальных измерительных систем**



# Одноволоконный многомодовый интерферометр с двумя модами

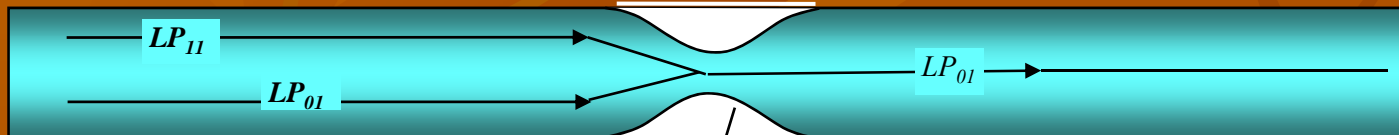


# Картина межмодовой интерференции на выходе из ОДИ

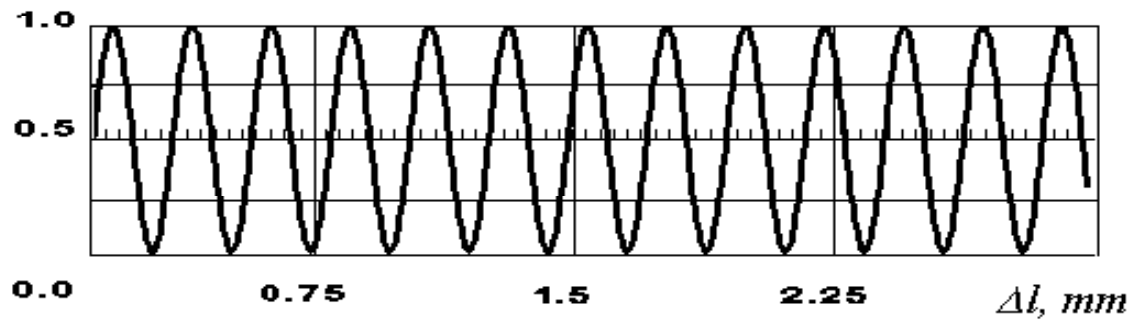


05.12.2011

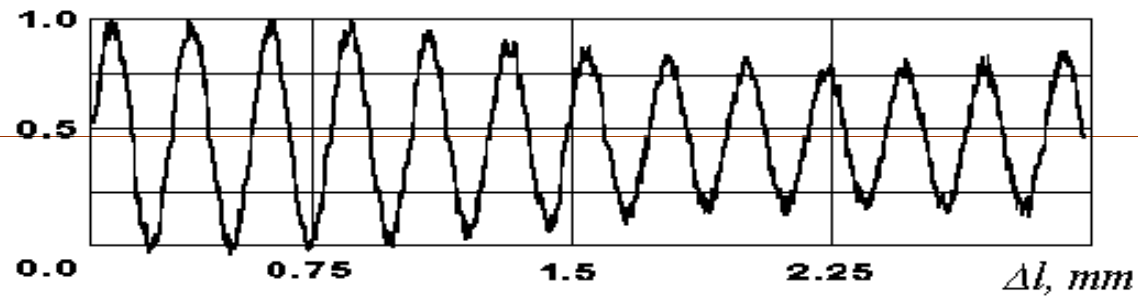
# Волноводная обработка сигналов ОДИ



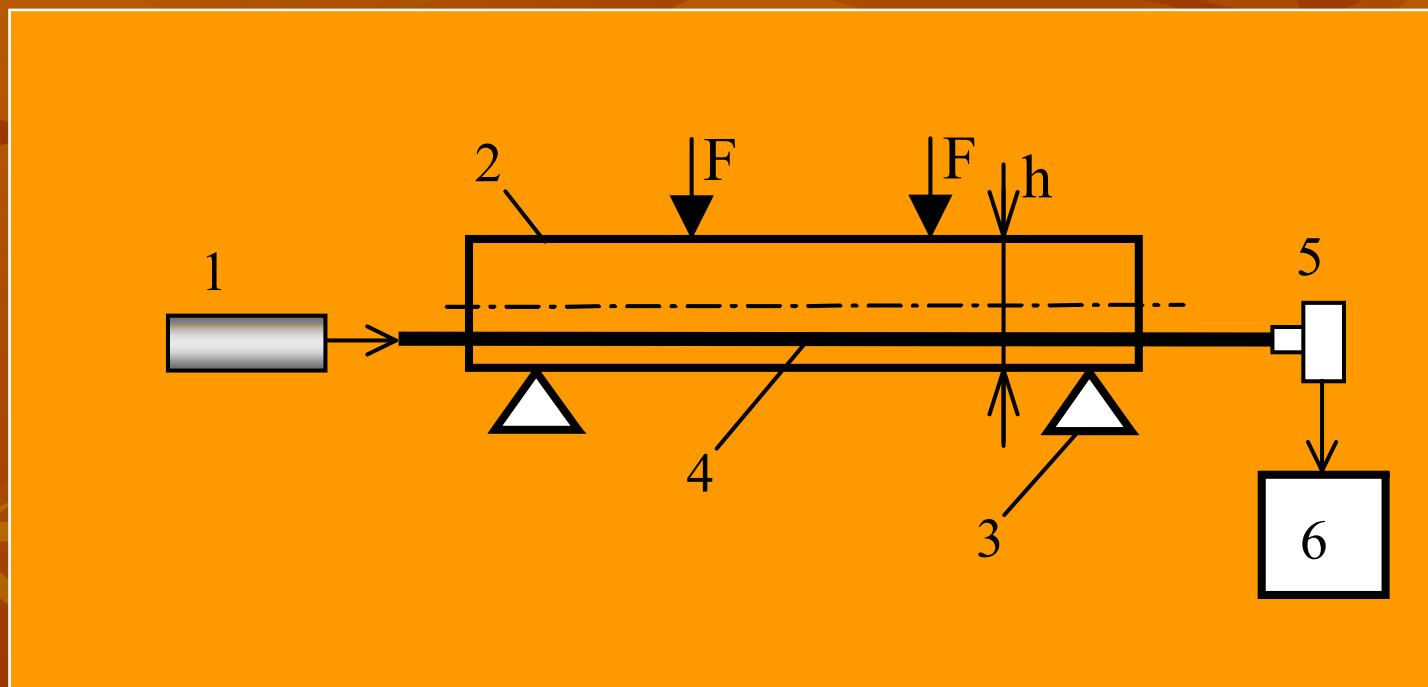
а)  $I, \text{отн.ед}$



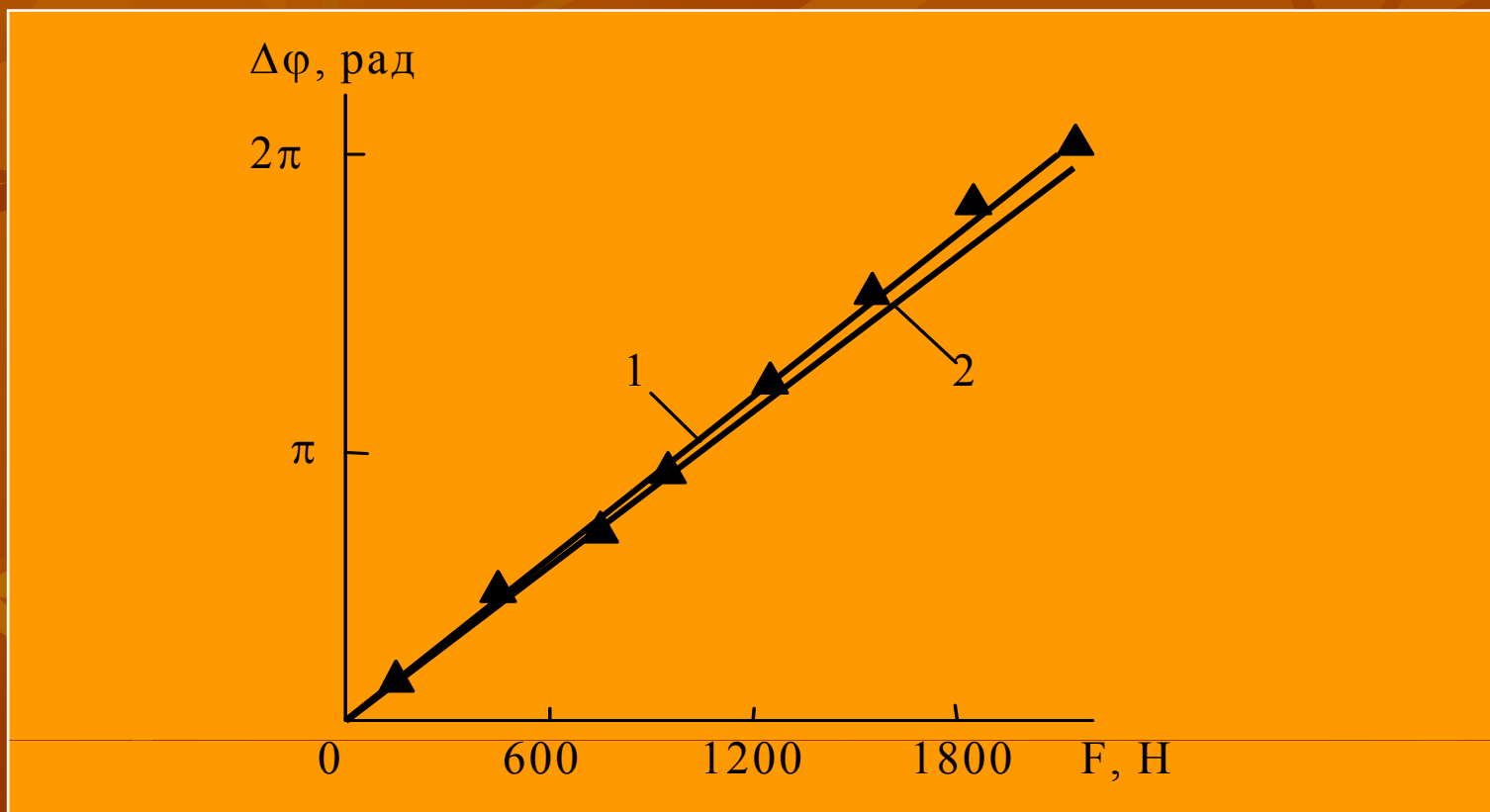
б)  $I, \text{отн.ед}$



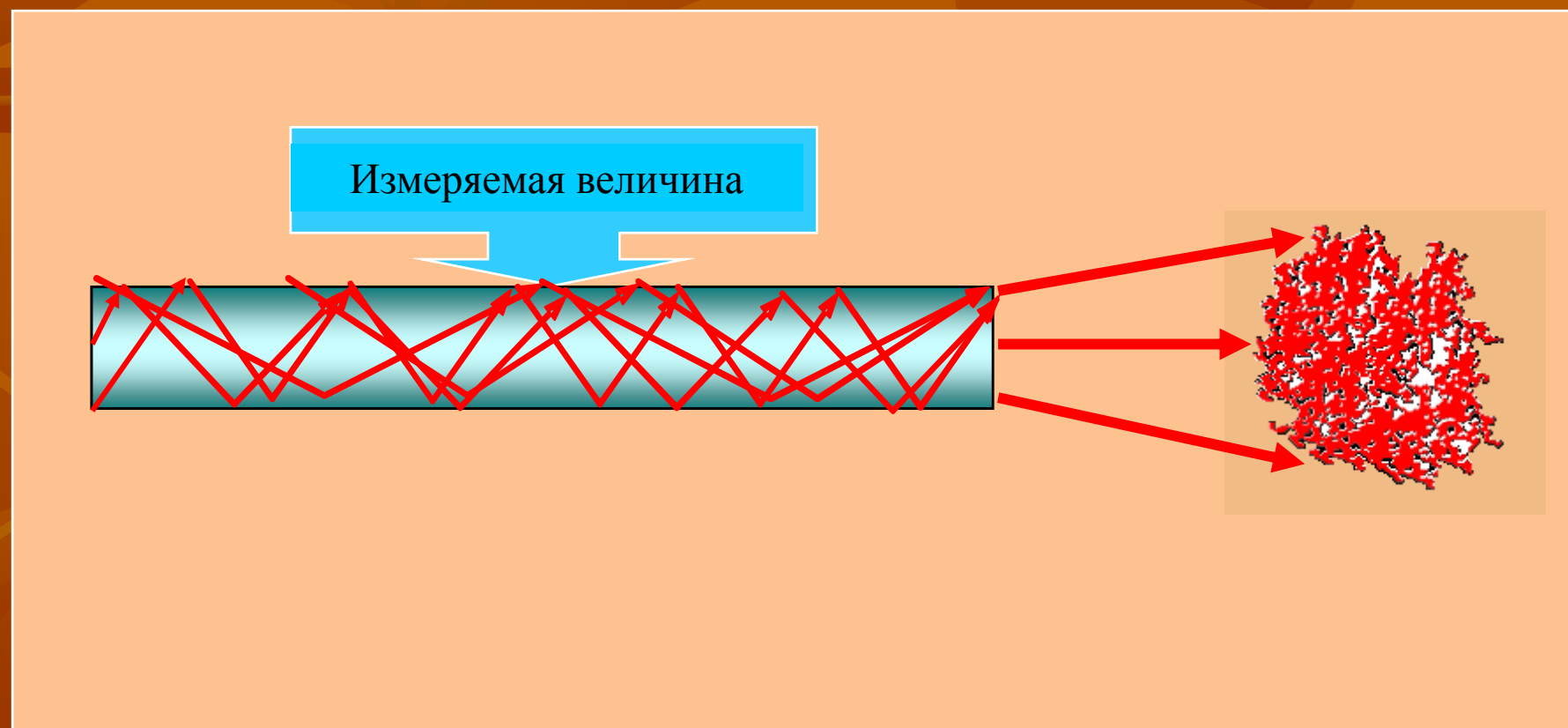
# Контроль процессов деформирования балок с использованием двухмодового ОМИ



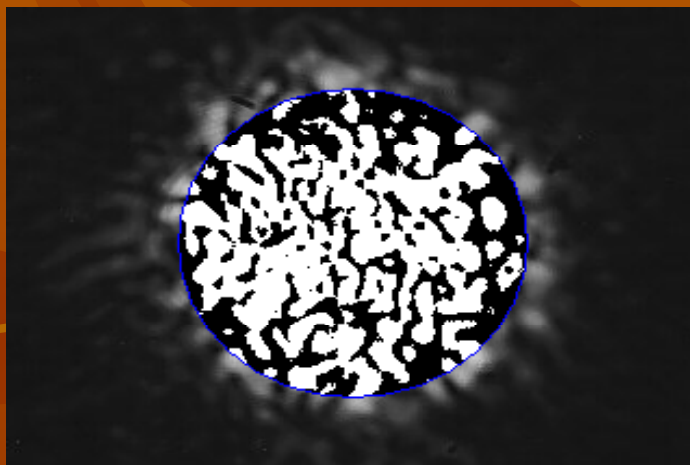
# Контроль процессов деформирования балок с использованием двухмодового ОМИ



# Одноволоконный многомодовый интерферометр с большим числом мод

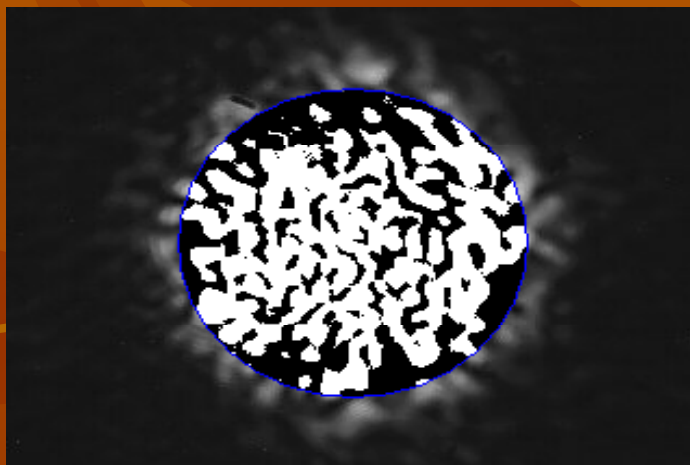


# Преобразования картины многомодовой интерференции



05.12.2011

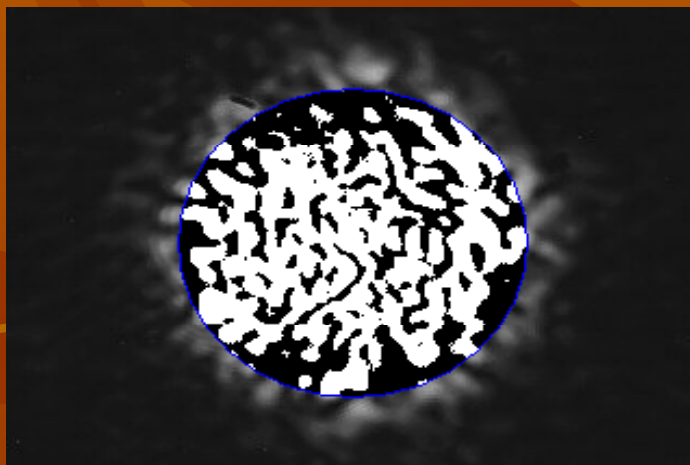
# Преобразования картины многомодовой интерференции



05.12.2011

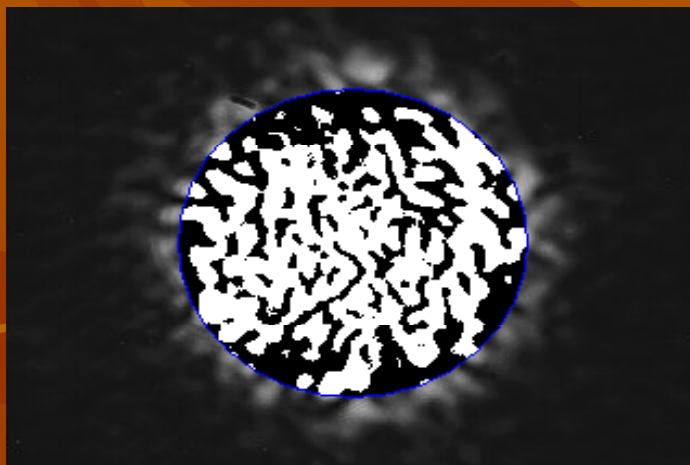


# Преобразования картины многомодовой интерференции



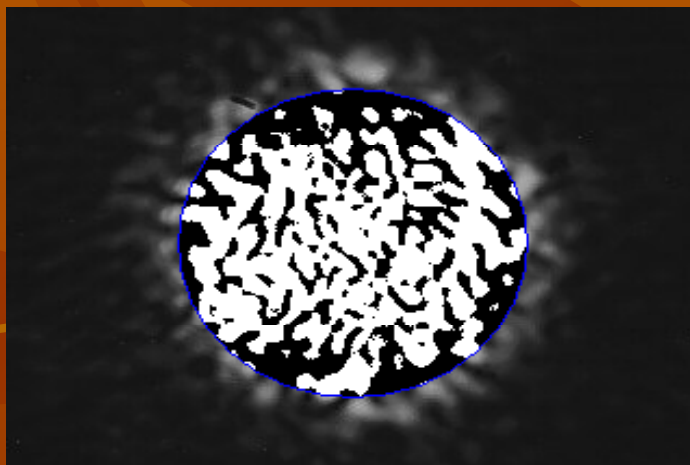
05.12.2011

# Преобразования картины многомодовой интерференции



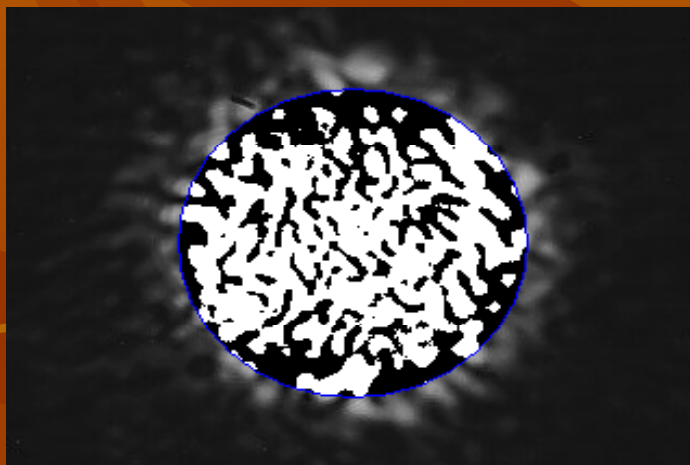
05.12.2011

# Преобразования картины многомодовой интерференции



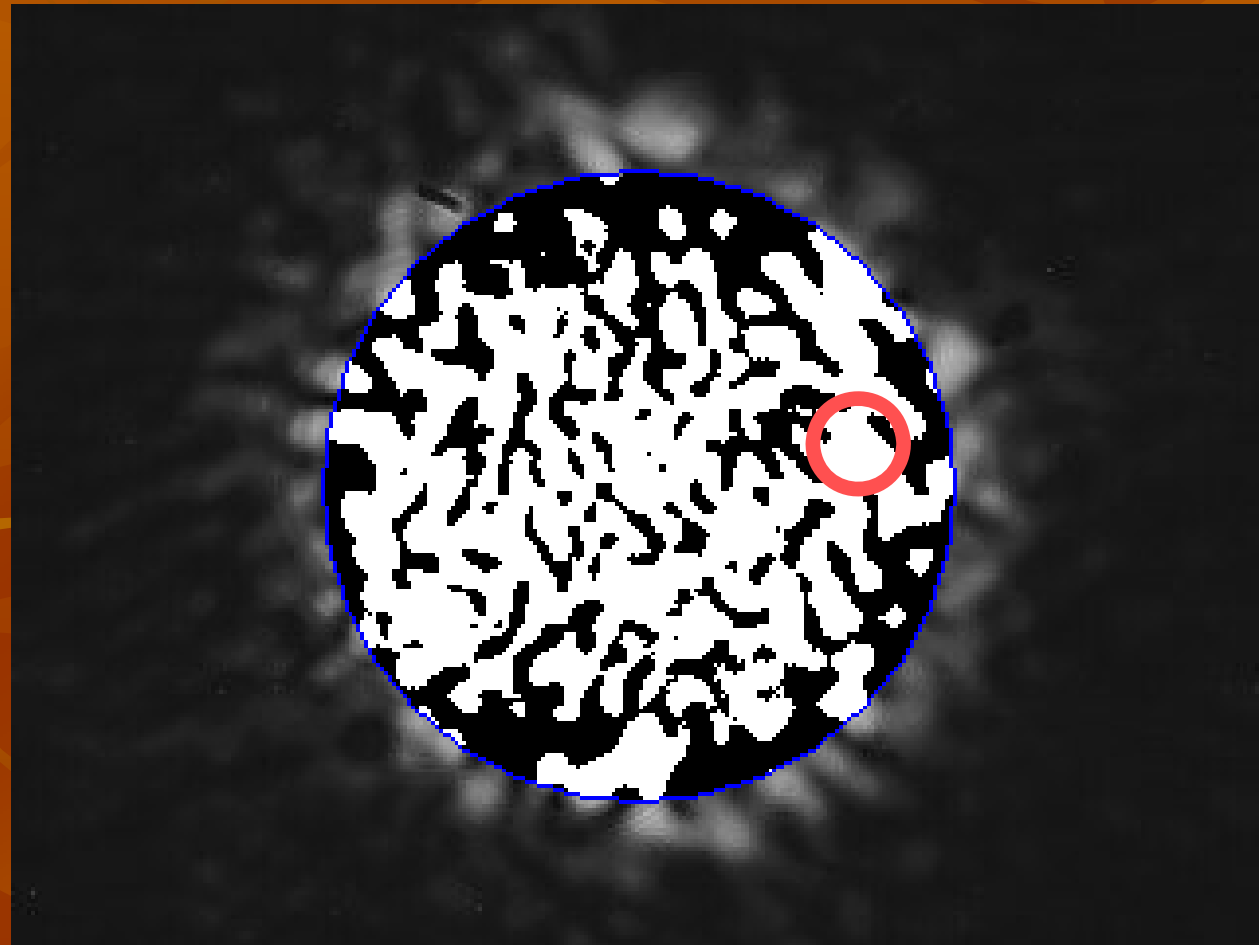
05.12.2011

# Преобразования картины многомодовой интерференции

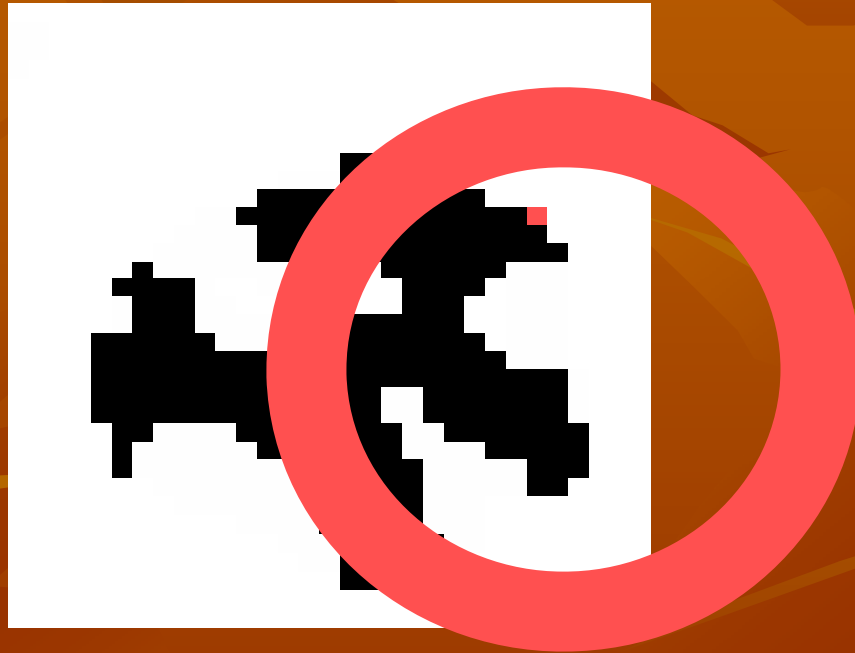


05.12.2011

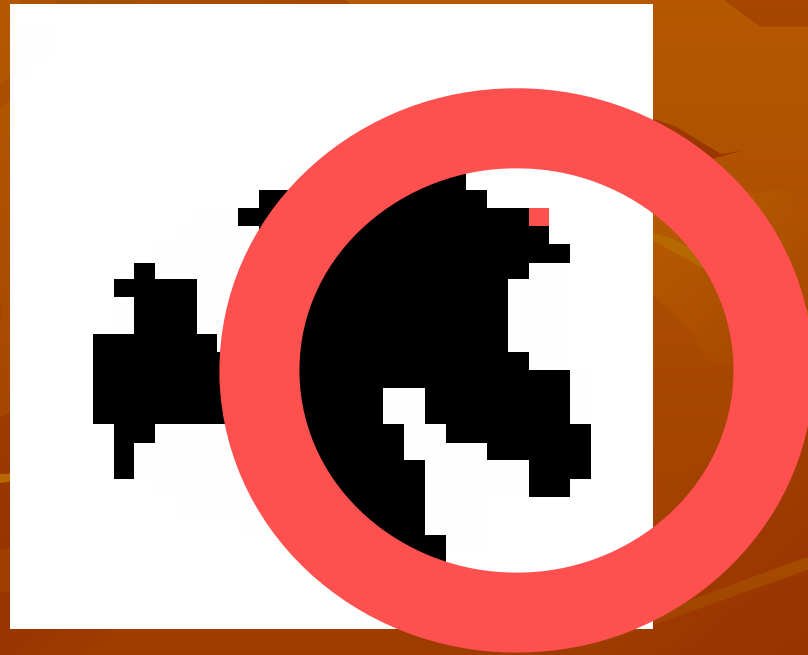
# Пороговое детектирование сигналов ОМИ



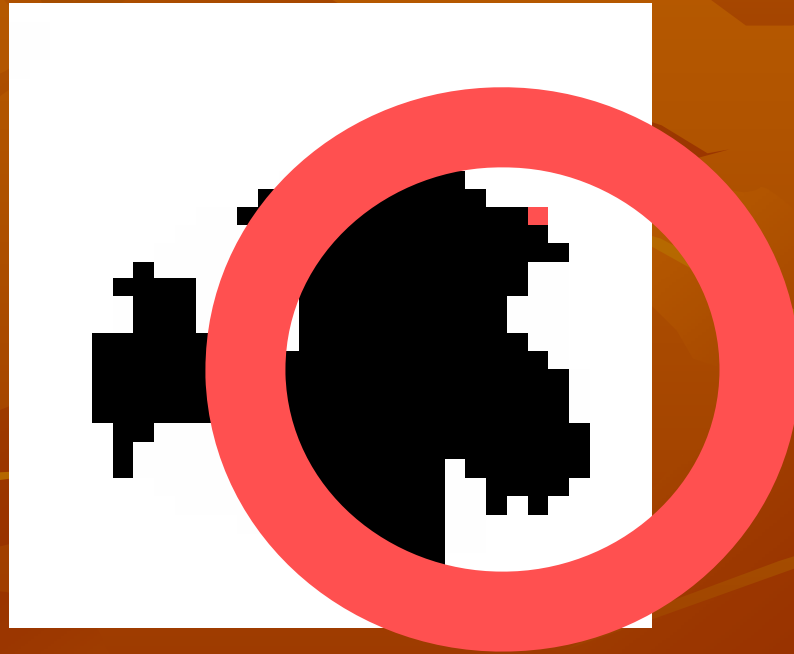
05.12.2011



05.12.2011



05.12.2011



05.12.2011



# Пороговый детектор на основе ОМИ

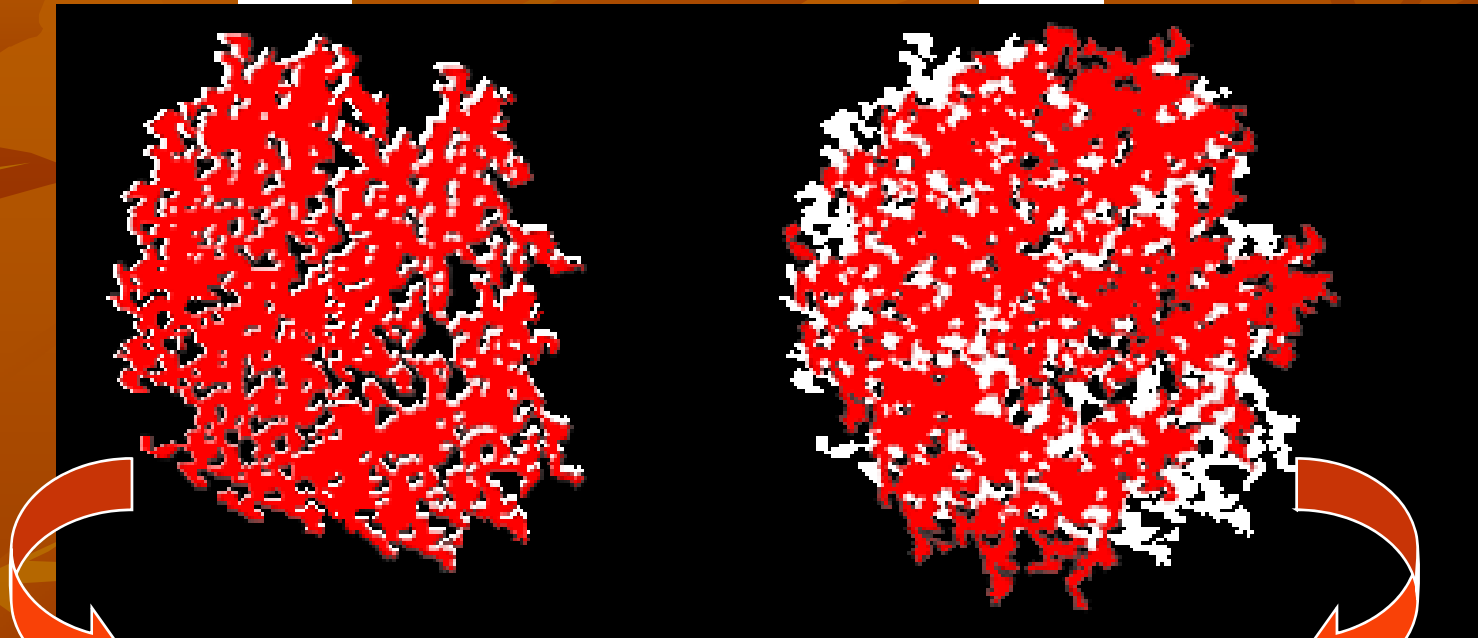


05.12.2011

# Корреляционная обработка сигналов ОМИ

$I_1$

$I_2$



$$\rho_{12} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2} \cdot \sqrt{\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2}}$$

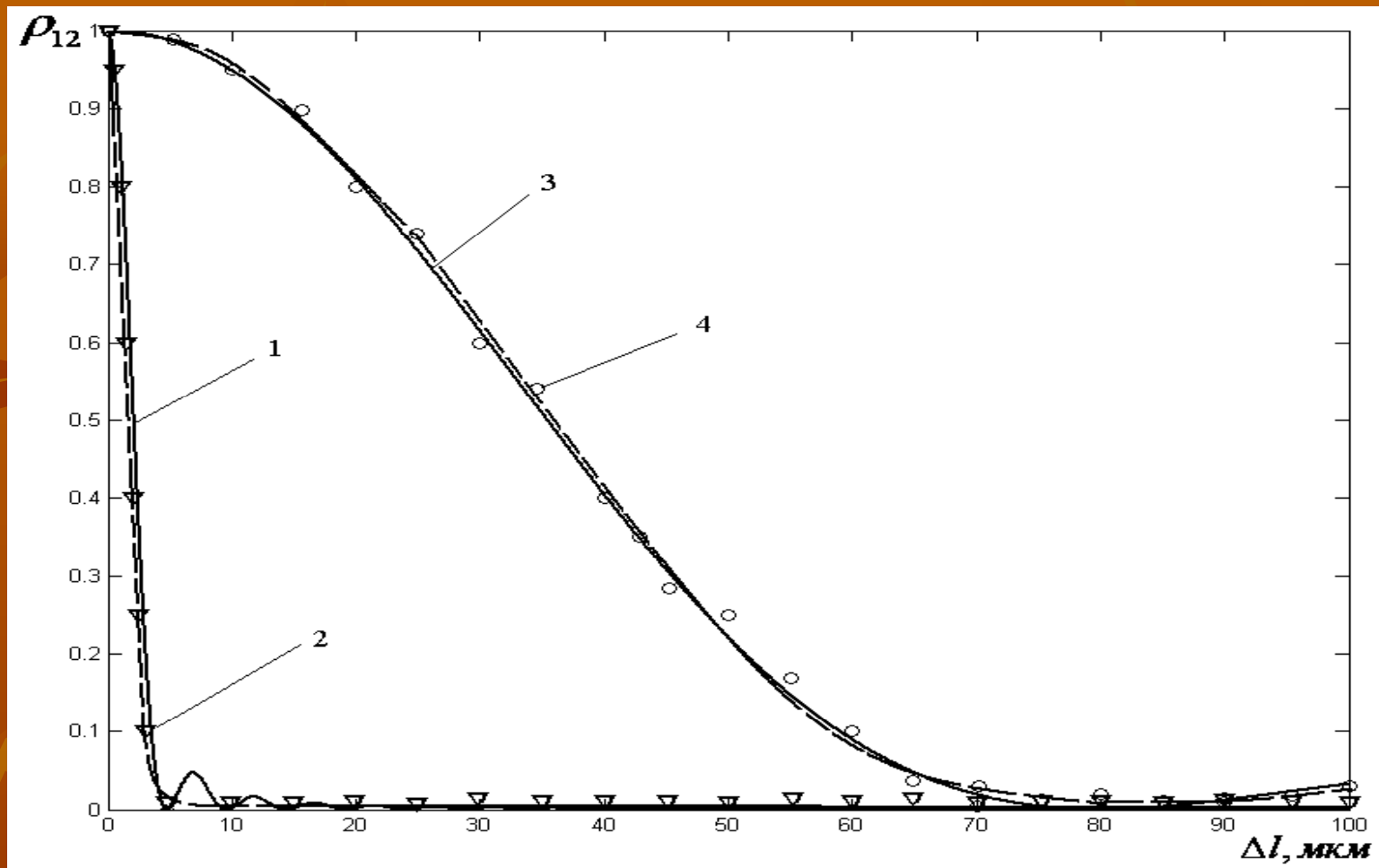
# Зависимость коэффициента корреляции спекловых полей от удлинения волоконного световода

$$I_q^{OMI}(x, y) = \sum_i \sum_j \sqrt{I_i^{md}(x, y) I_j^{md}(x, y)} \cdot \cos(\Psi_i + (q-1) \cdot \Delta\Psi_i - \Psi_j - (q-1) \cdot \Delta\Psi_j)$$

$$\rho_{12} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta l}{\Delta l_0}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot \Delta l}{\Delta l_0}\right)^2} \quad \text{где} \quad \Delta l_0 = \frac{\lambda}{\Delta n(1 - \mu\tilde{\zeta})} \quad - \quad \text{Характерное удлинение ВС}$$

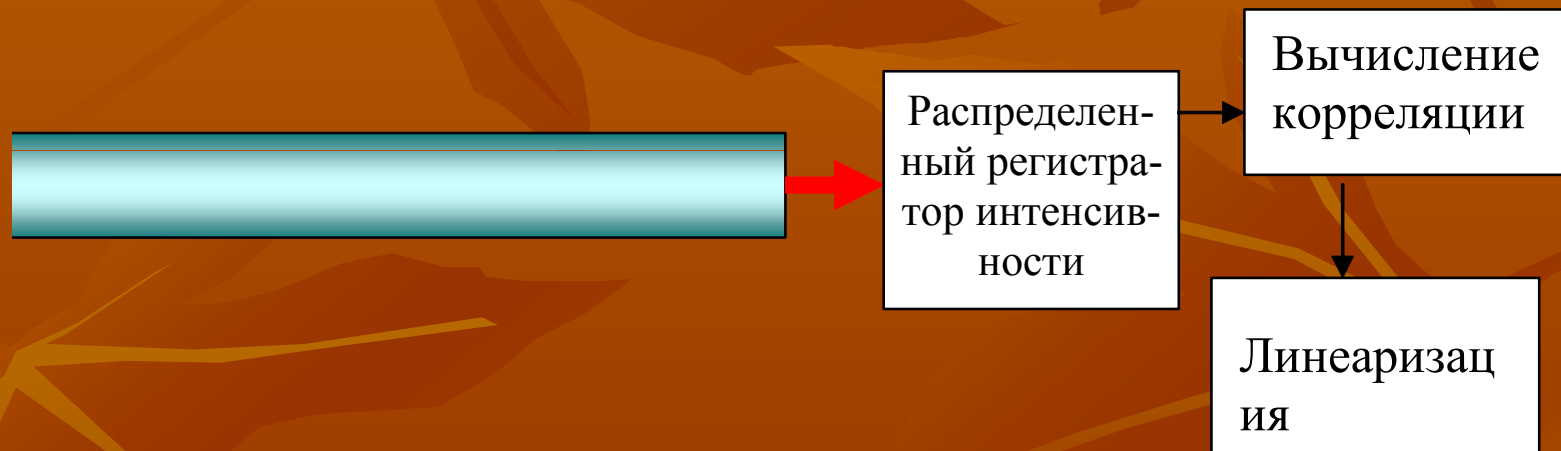
$\lambda$  - длина волны излучения,  $\mu$  - коэффициент Пуассона,

$$\tilde{\zeta} = 2 - \frac{\pi}{V}, \quad k = 2\pi / \lambda$$

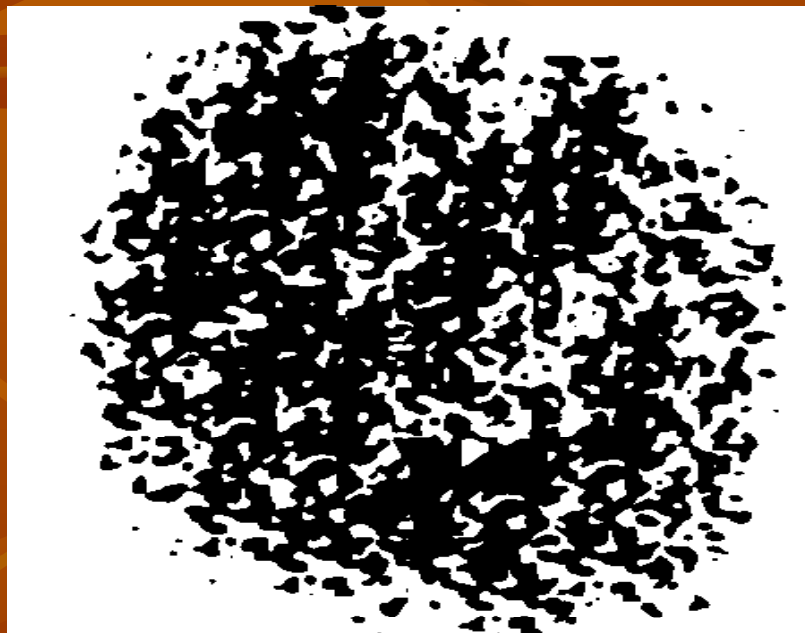


Зависимость коэффициента корреляции от удлинения световода: теоретическая зависимость для ВС с числовой апертурой 0.6 - кривая 1, экспериментальная - кривая 2, теоретическая зависимость для ВС с числовой апертурой 0.2 - кривая 3, экспериментальная - кривая 4.

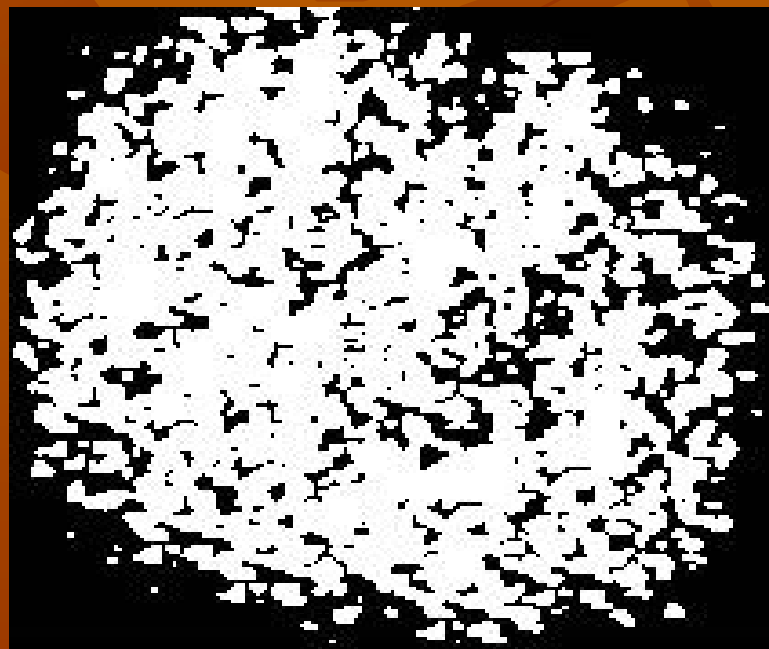
# Корреляционный метод обработки сигналов ОМИ



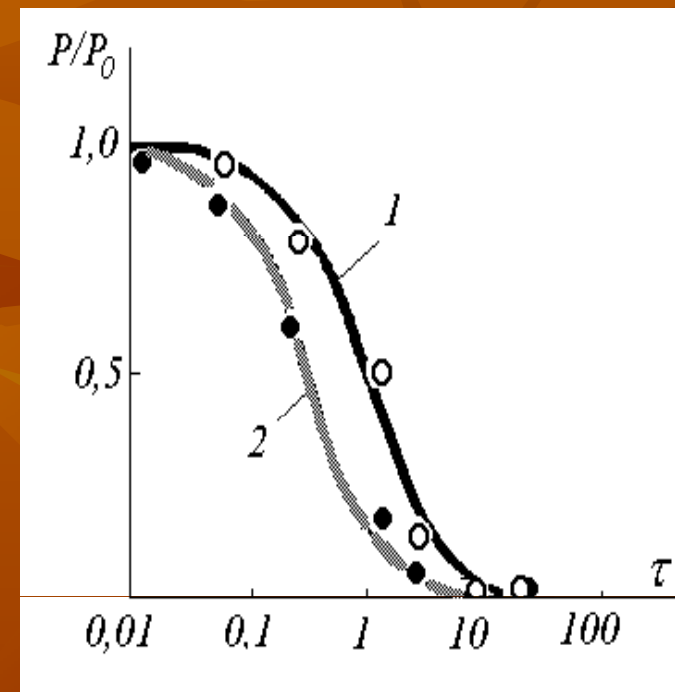
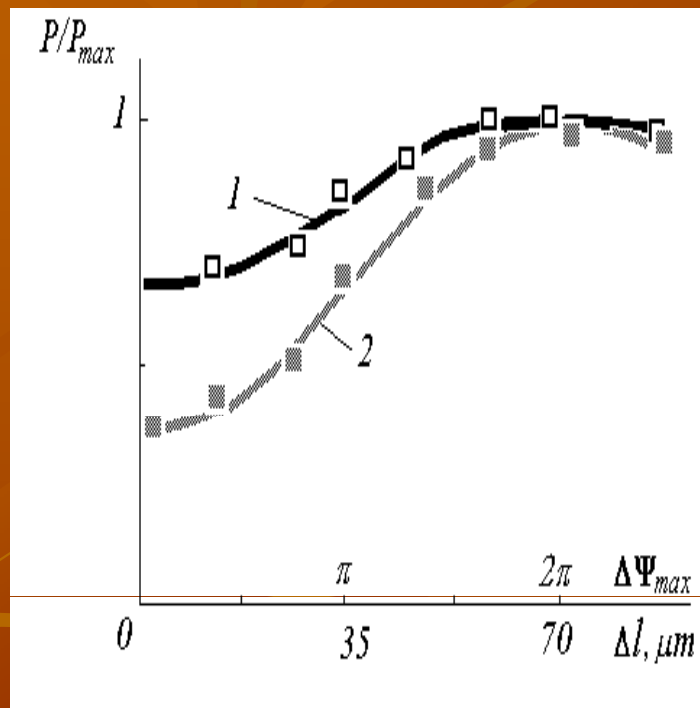
**Исходное  
спекловое  
поле**



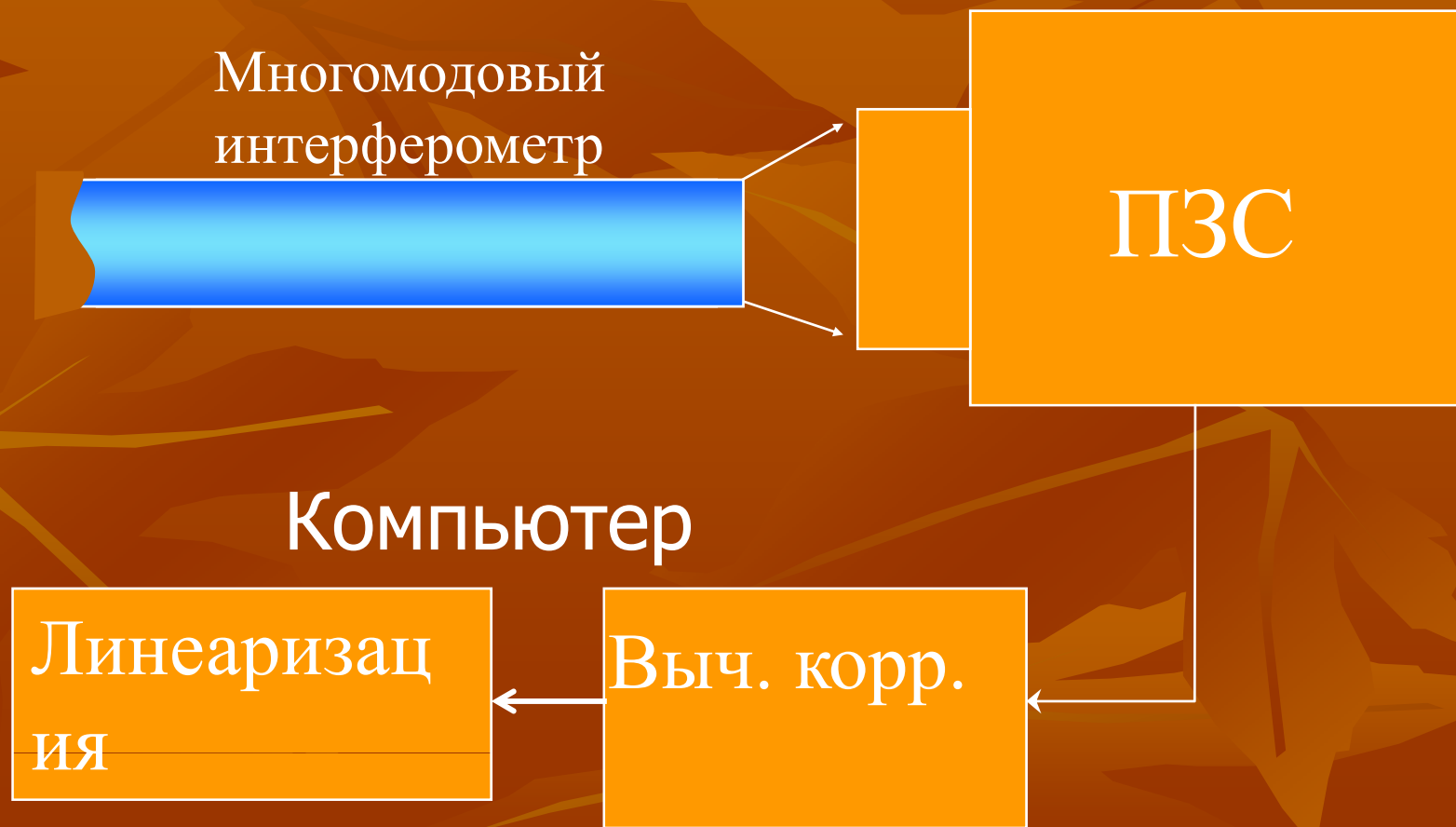
**Фотографический  
амплитудный  
корр. фильтр**



# Корреляционная обработка сигналов ОМИ фотографическим фильтром



# Корреляционная обработка сигналов ОМИ с использованием приборов с зарядовой связью

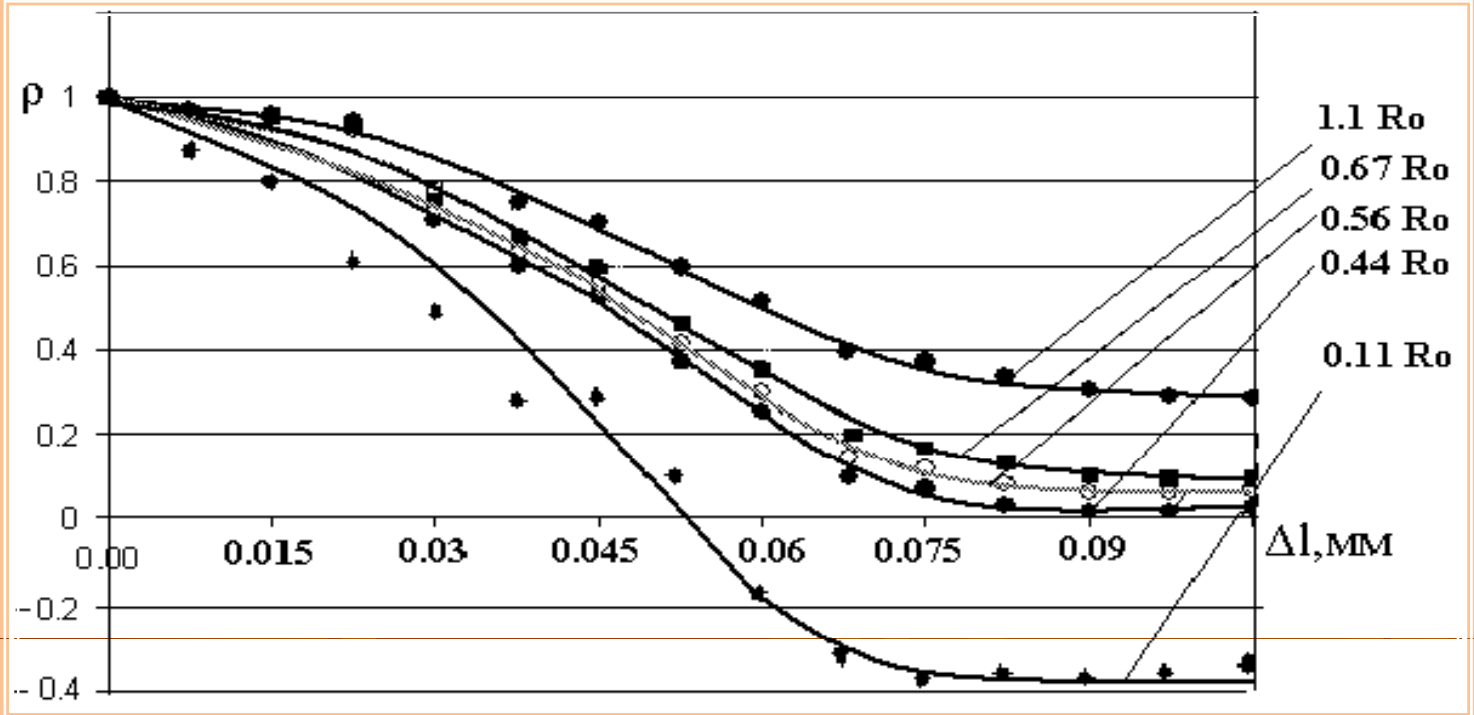
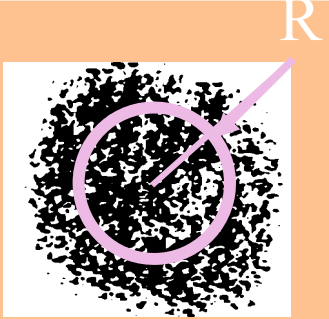


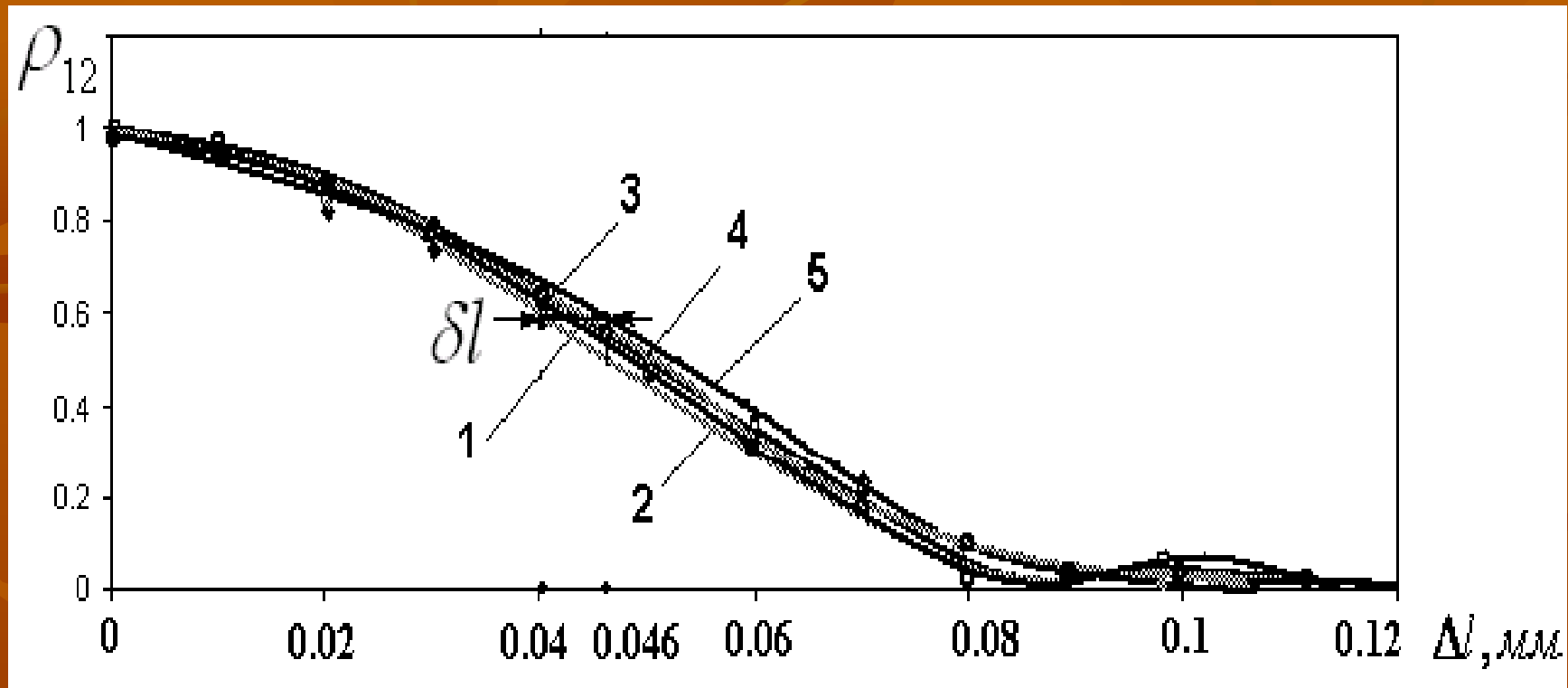


# Зависимость коэффициента корреляции от удлинения ВС.

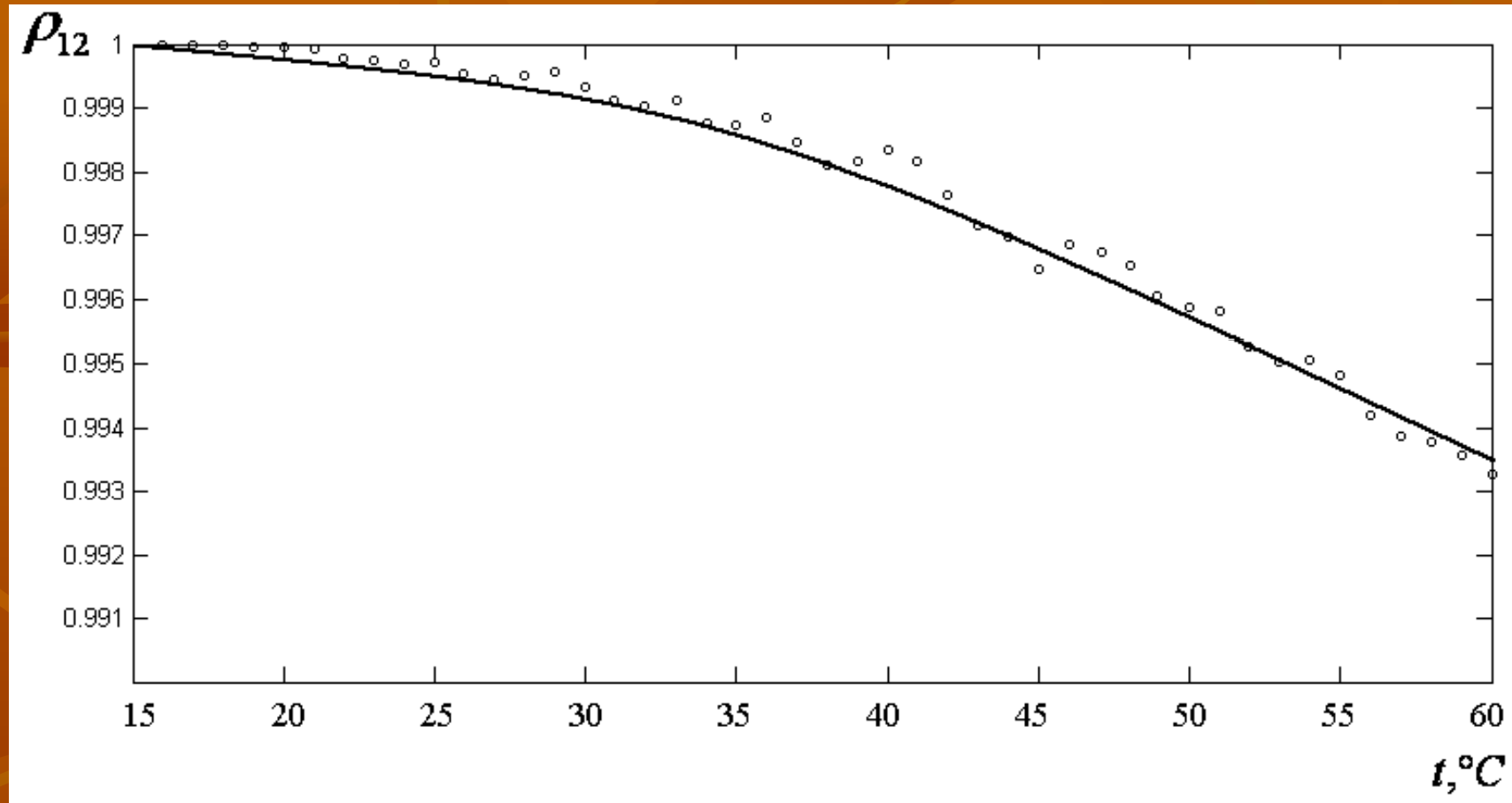
$$R_o / 3 < R < R_o$$

$$\bar{X} / X_{\max} = 0.15$$

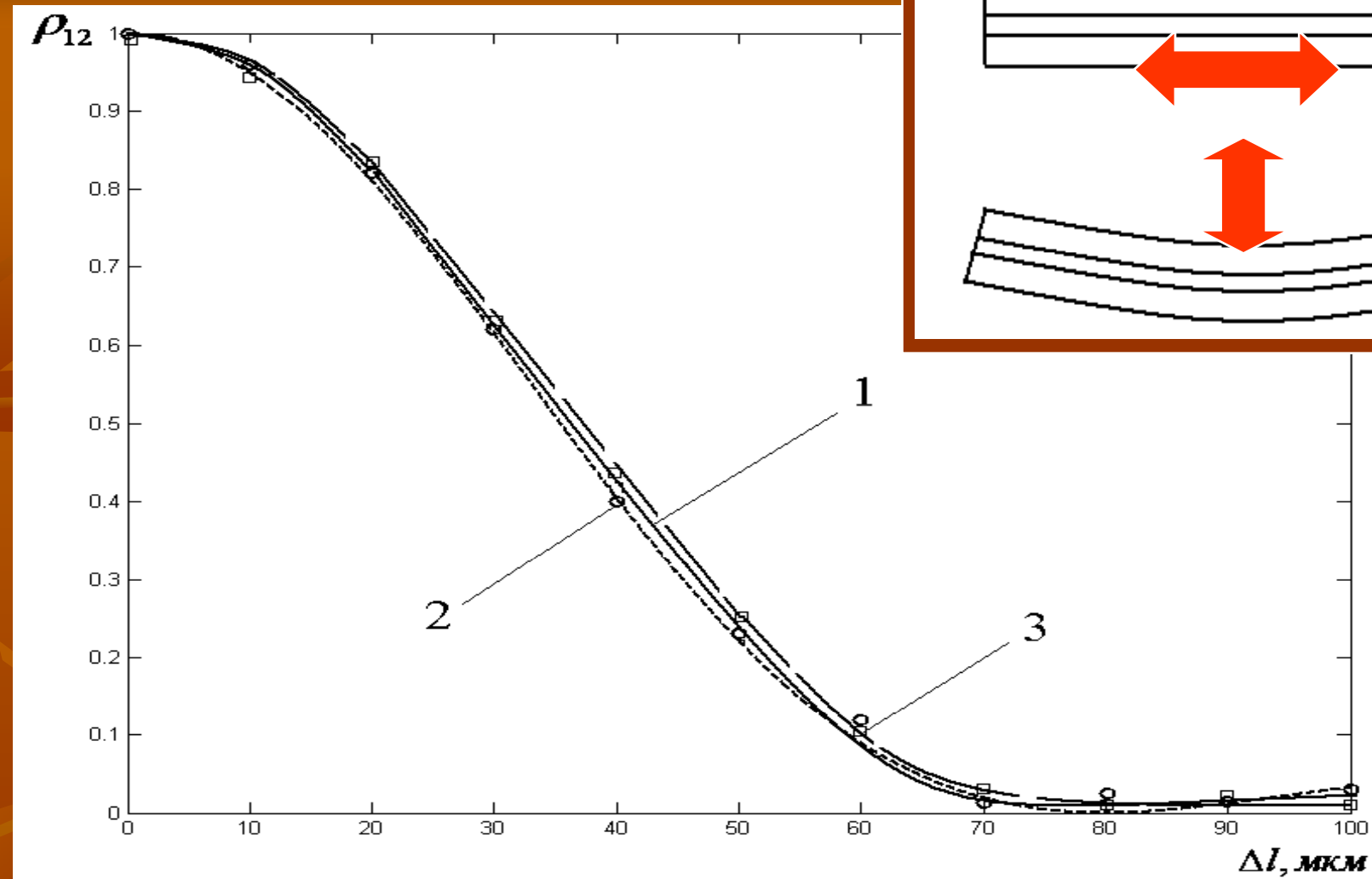




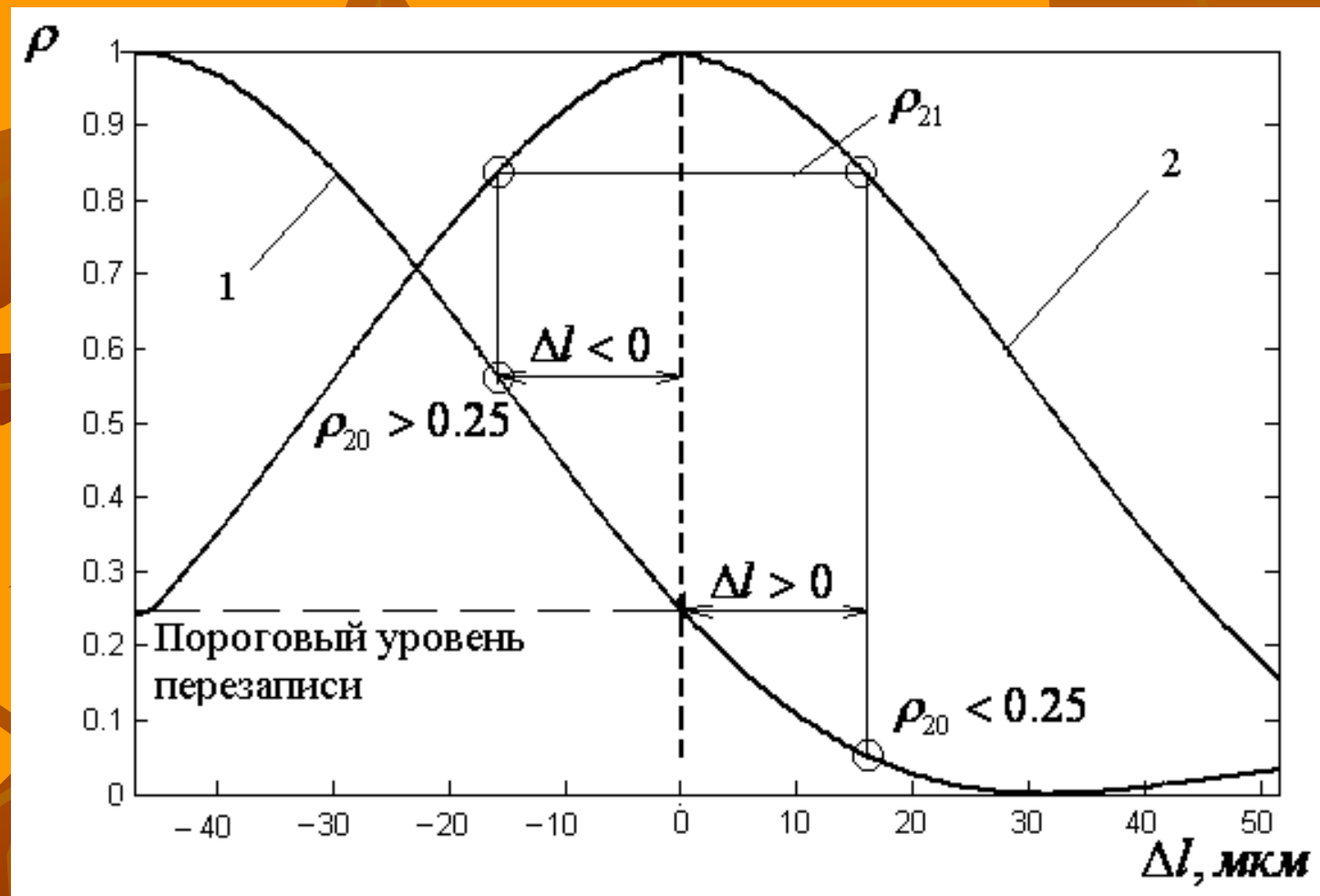
*Зависимости  $\rho_{12}(\Delta l)$ , полученные при использовании различных опорных изображений. Из них 1 – расчетная кривая, кривые 2-5 получены непосредственно при аксиальном растяжении ВС.*



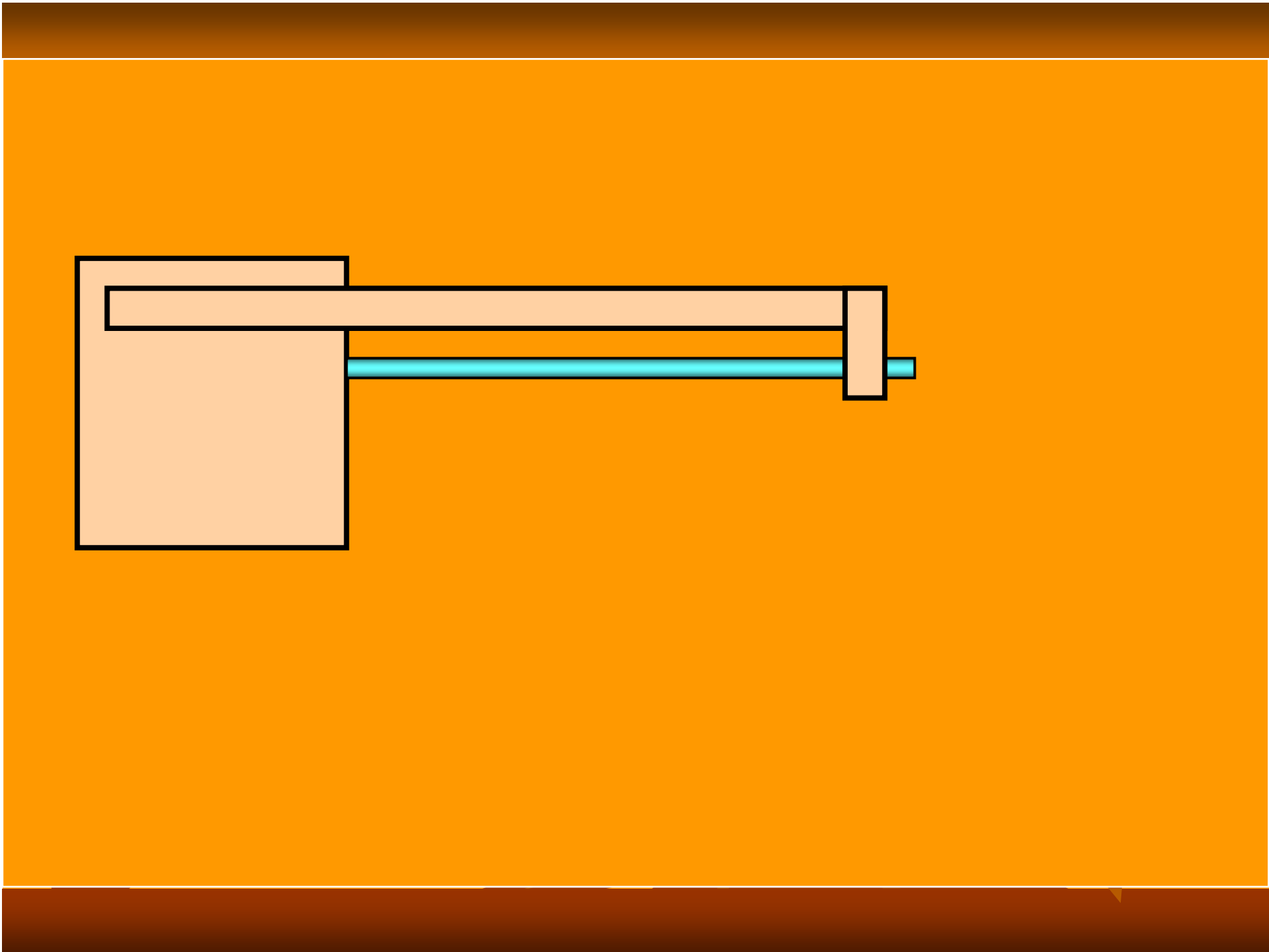
*Зависимость коэффициента корреляции от температуры*

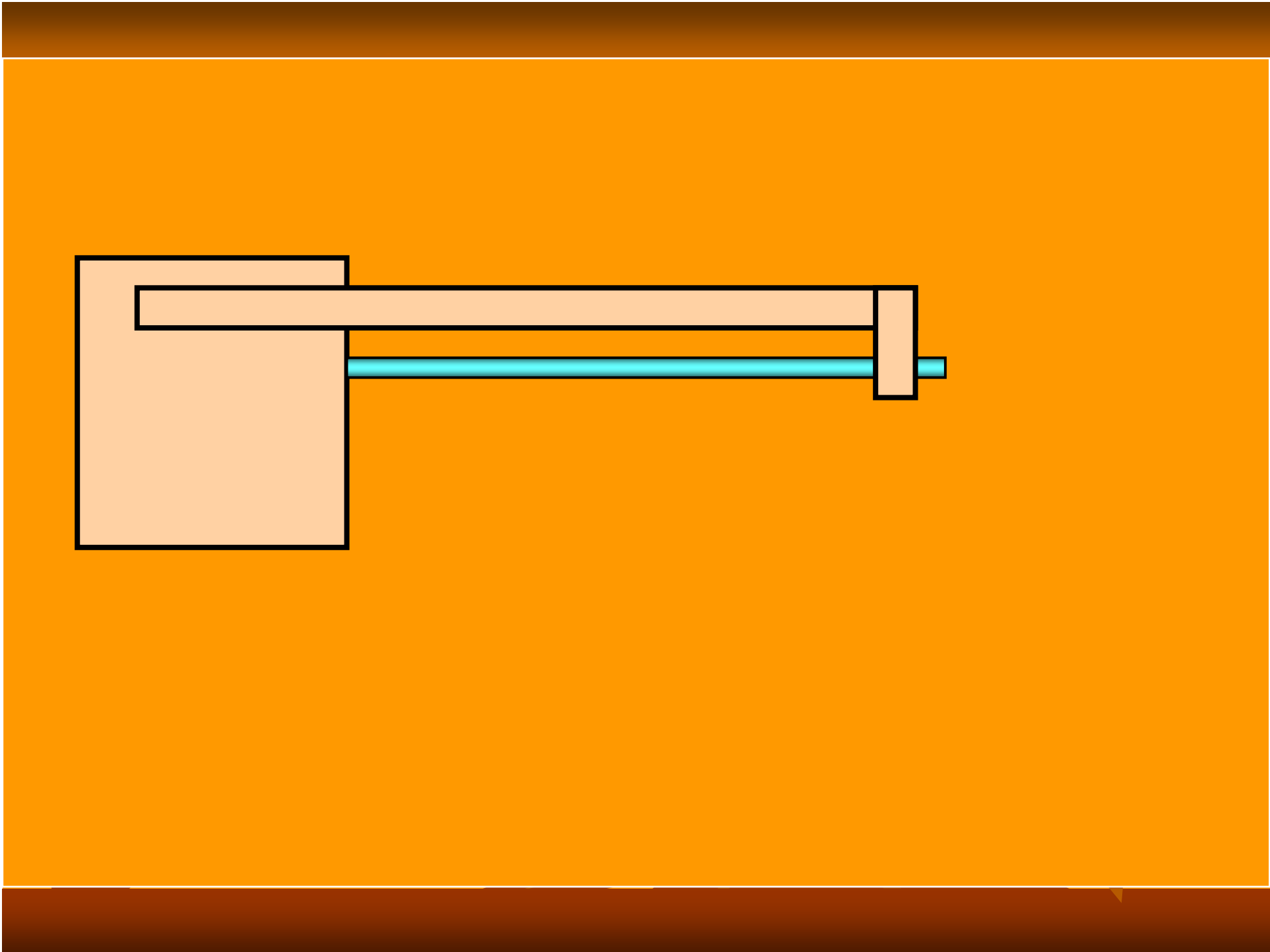


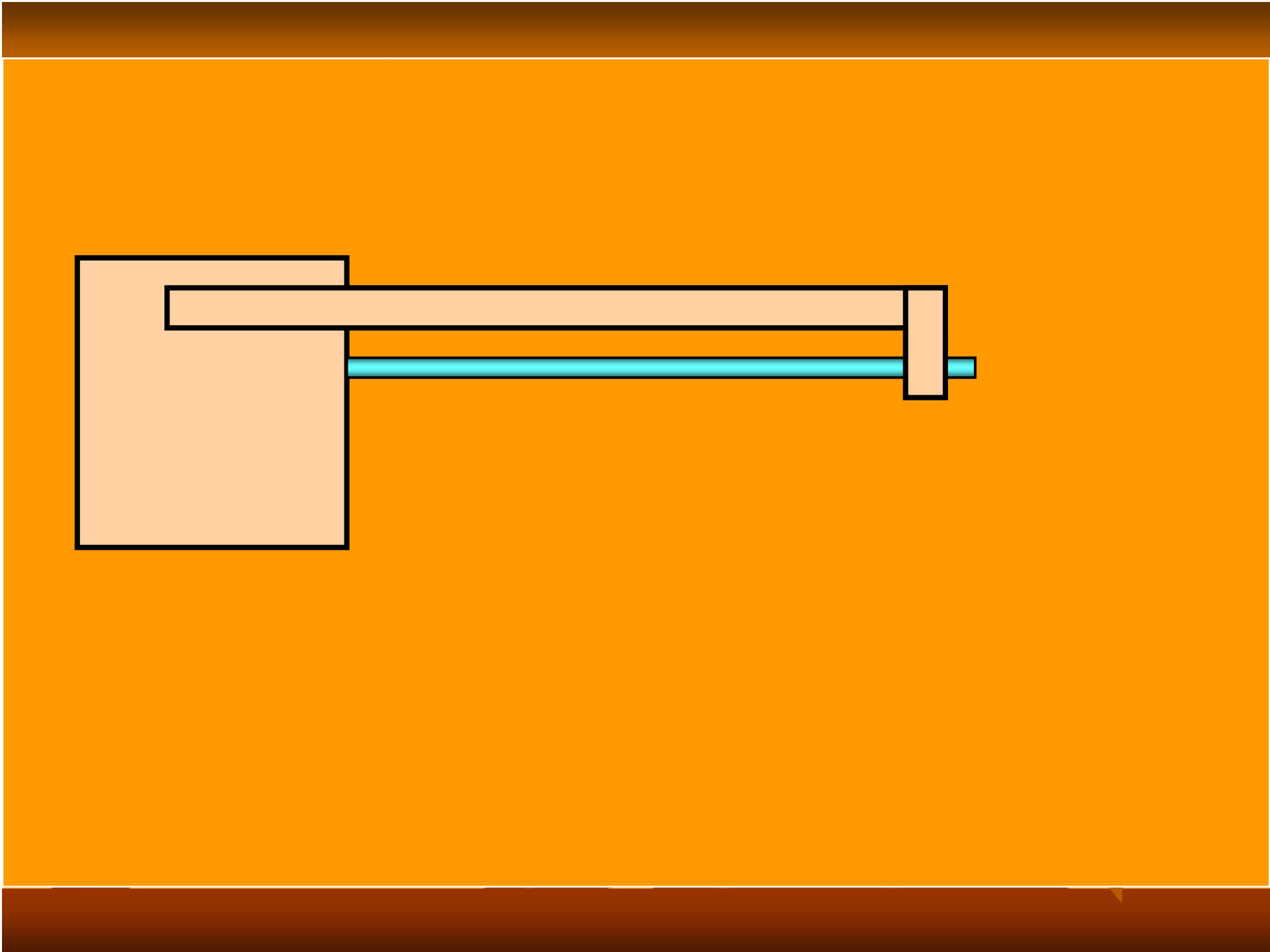
Зависимость коэффициента корреляции от удлинения ВС с числовой апертурой 0.6: 1 - расчетная кривая, 2 – кривая, полученная при аксиальном растяжении ВС, 3 – кривая, полученная при растяжении, вызываемом прогибом натянутого ВС.



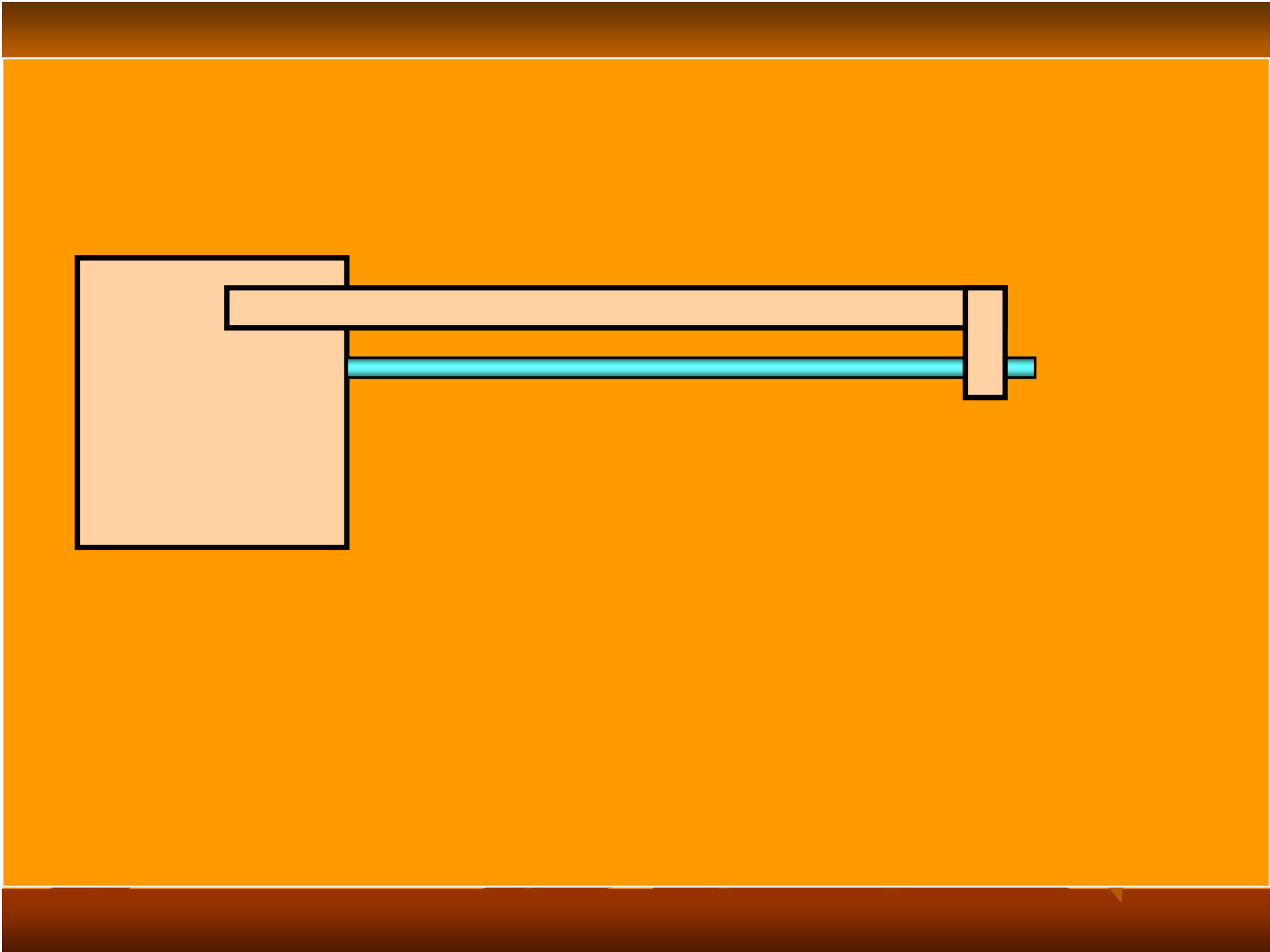
Определение знака удлинения световода в ОМИ: 1 – зависимость, используемая для определения абсолютной величины, 2 – зависимость, используемая для определения знака удлинения.

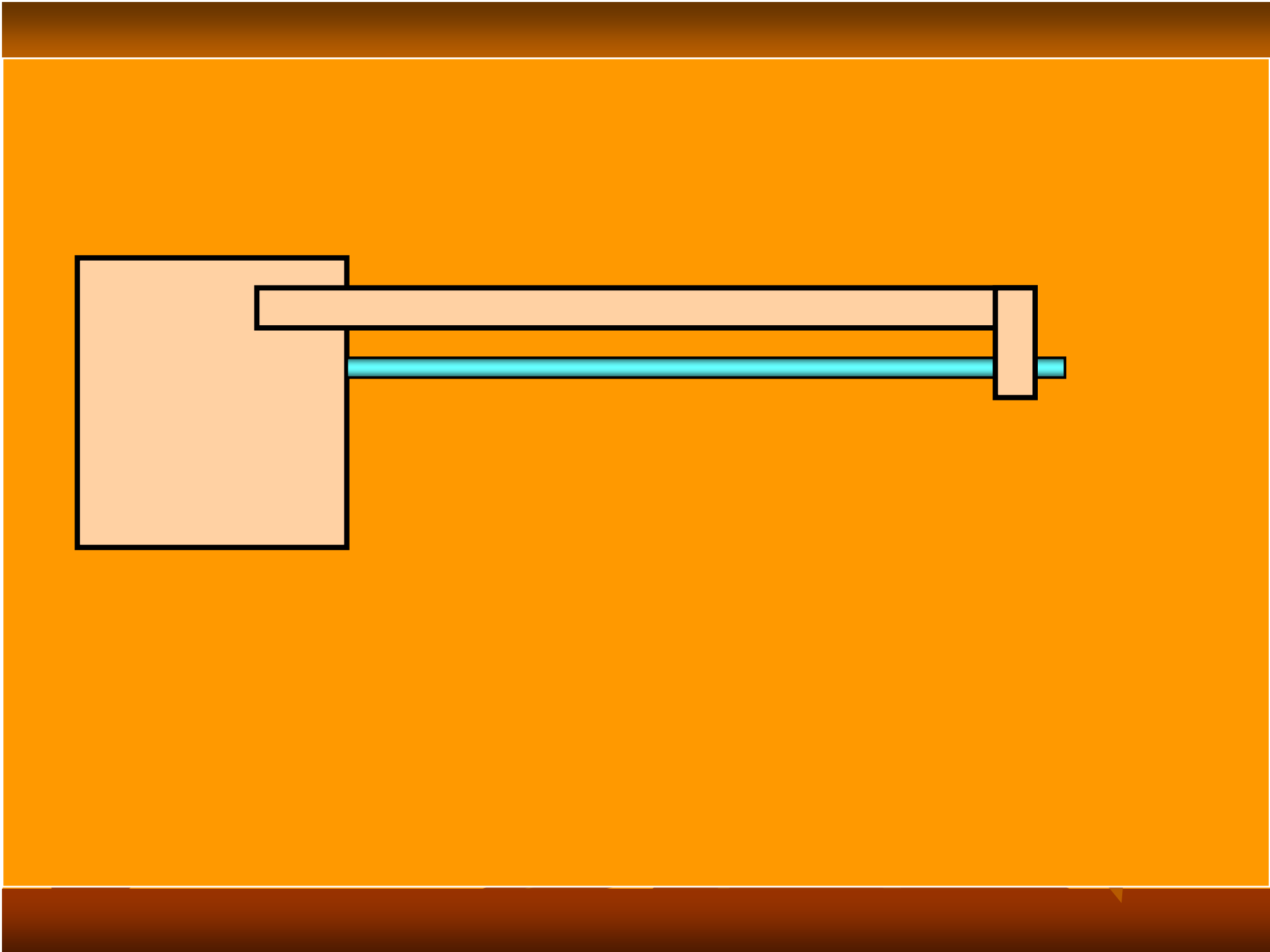


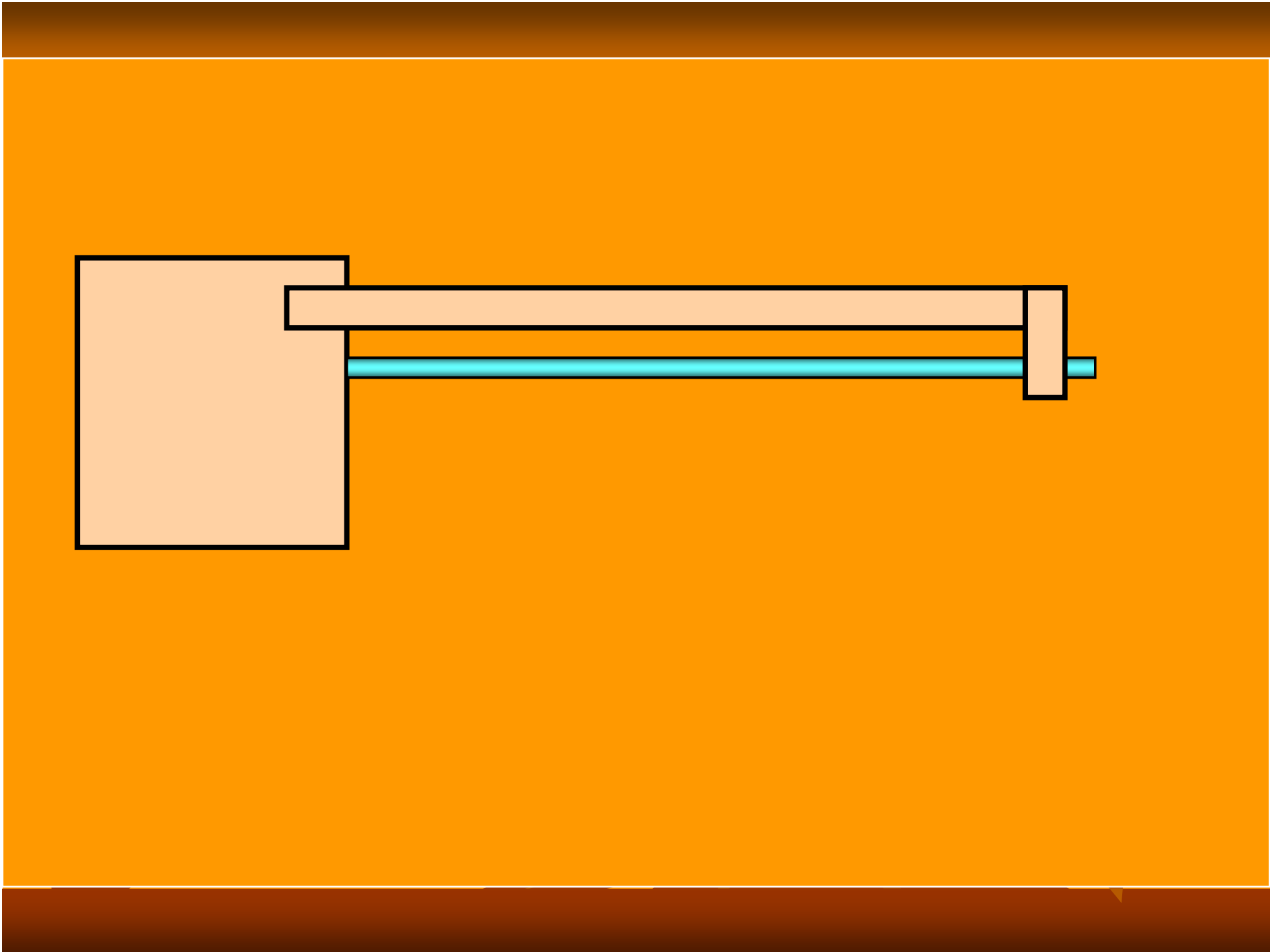


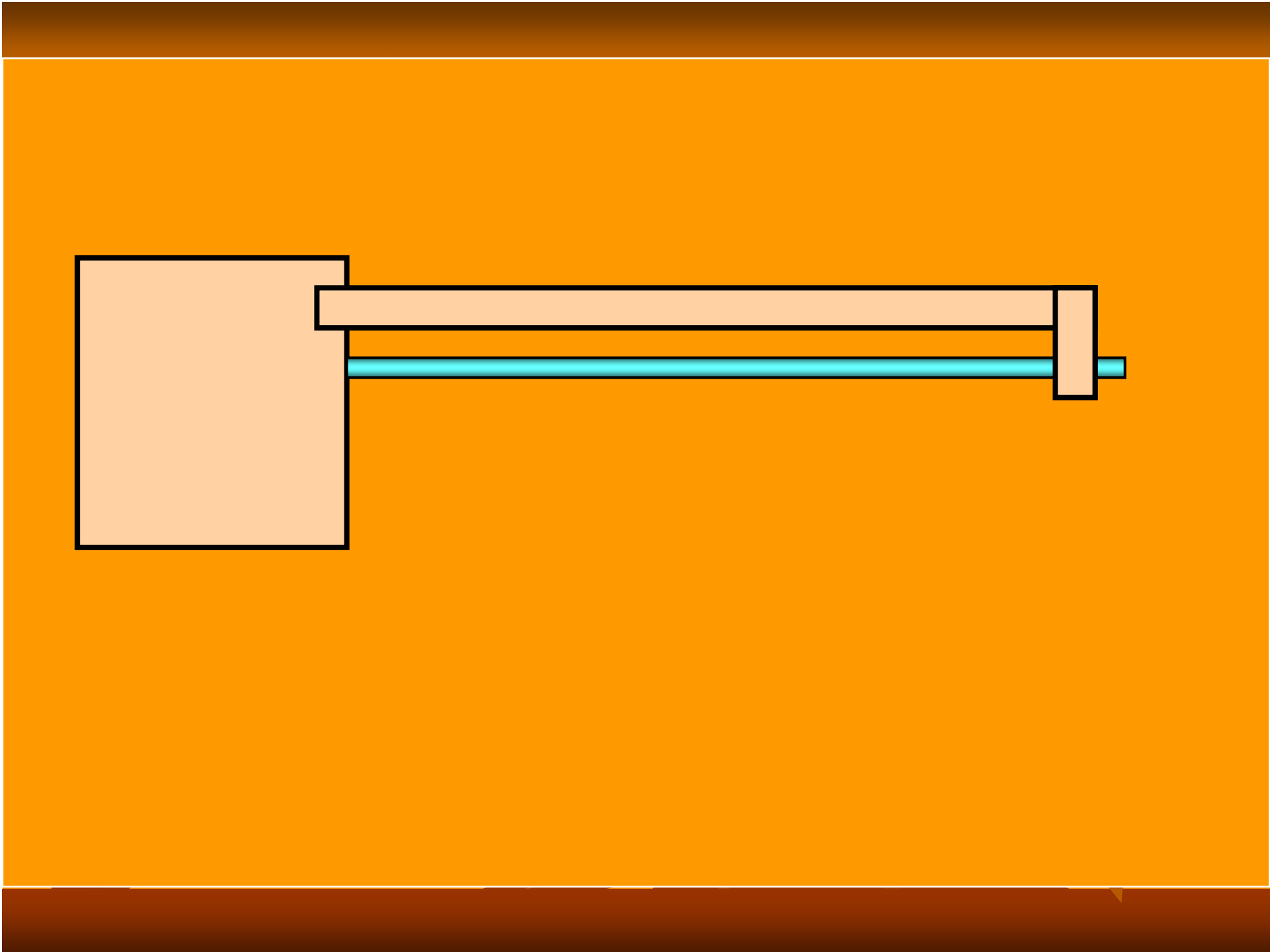


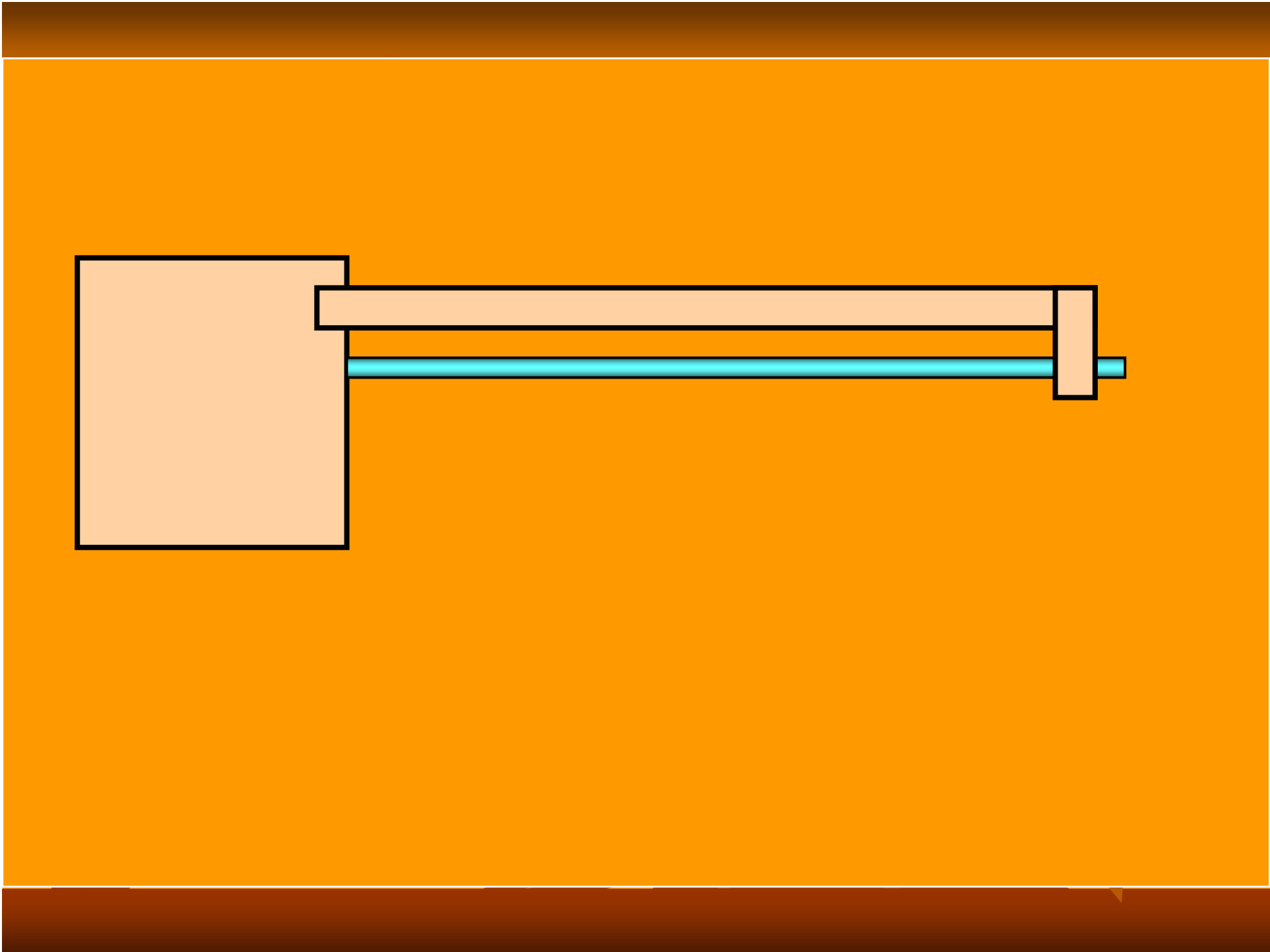


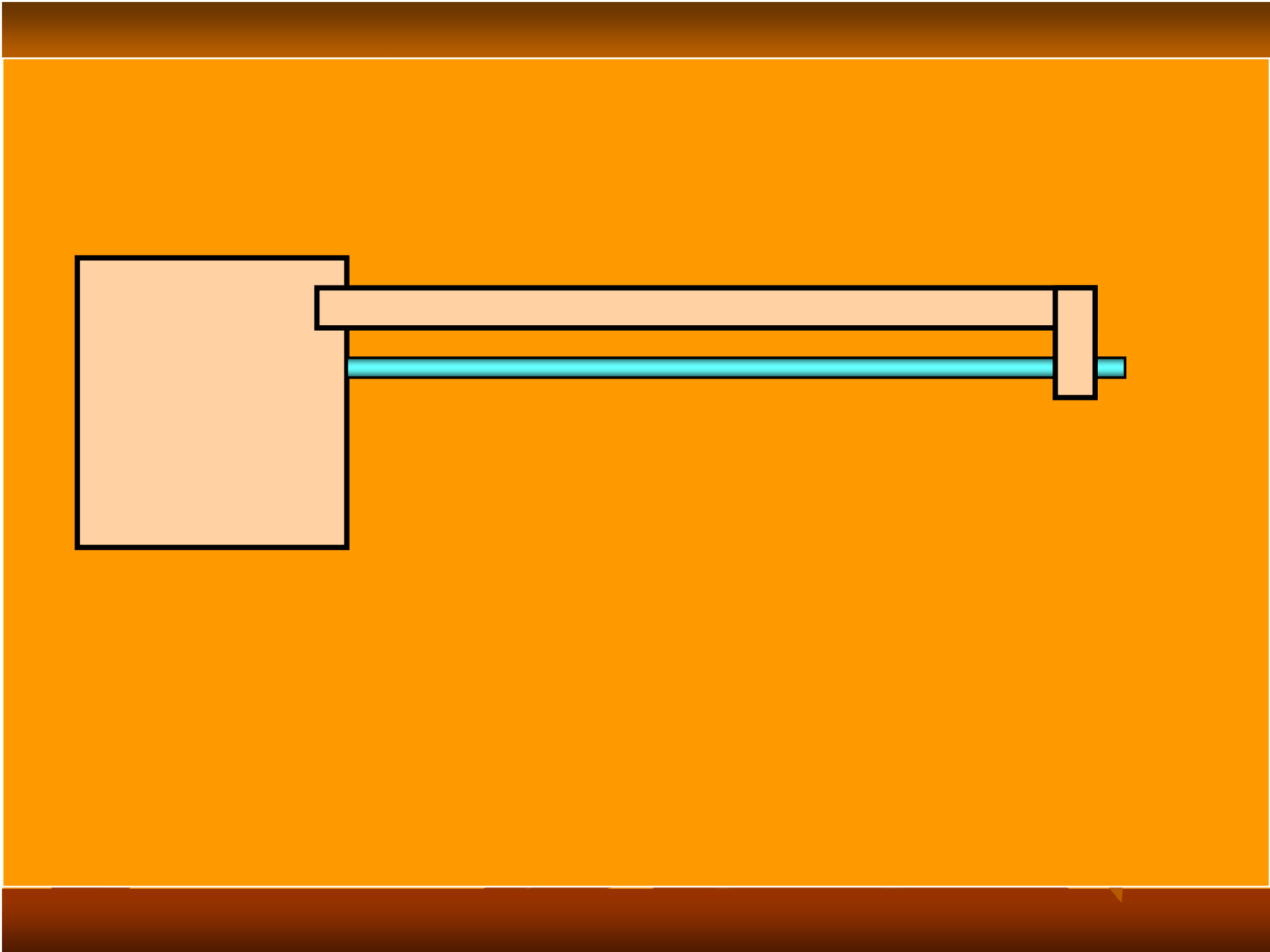


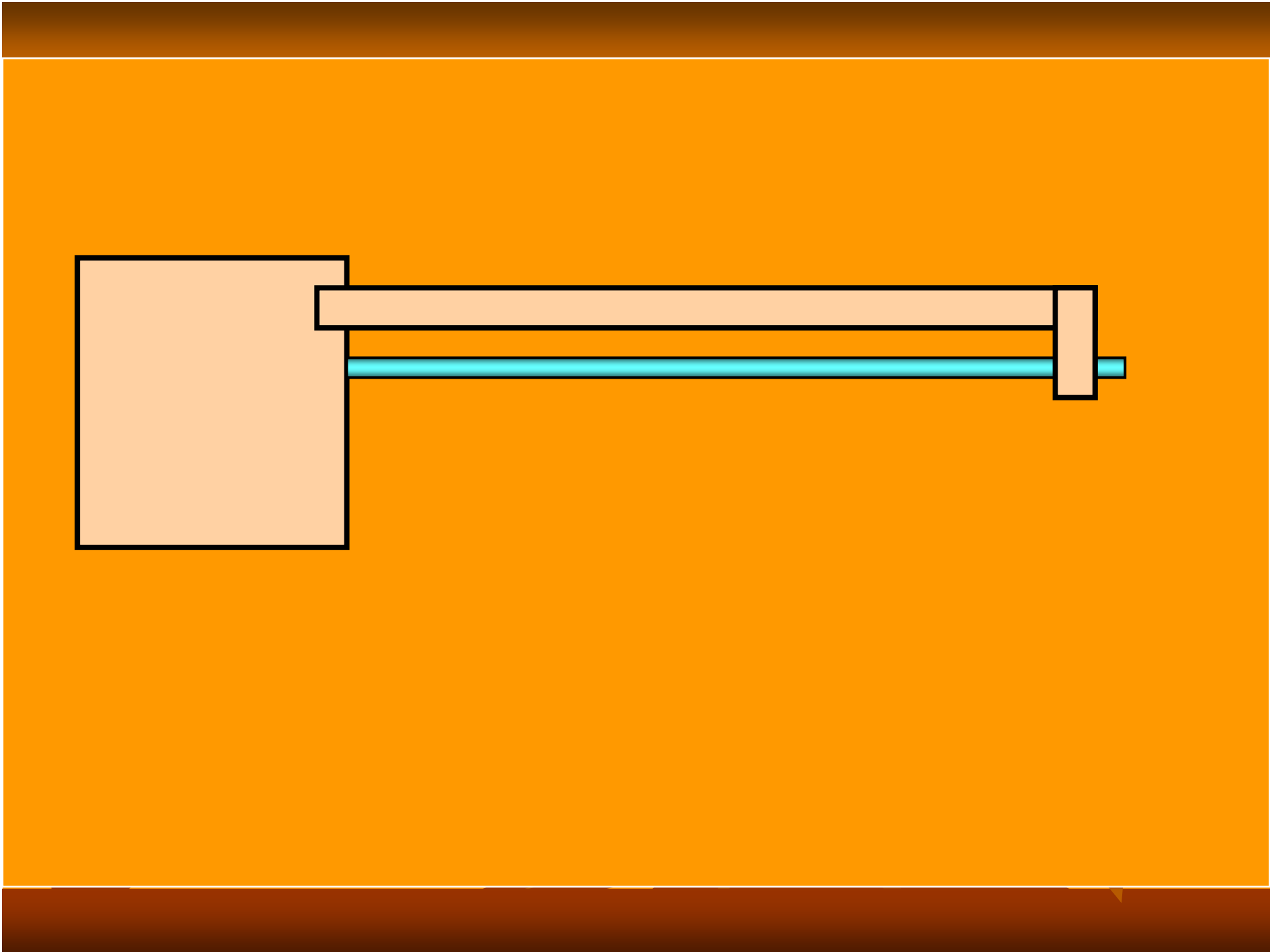


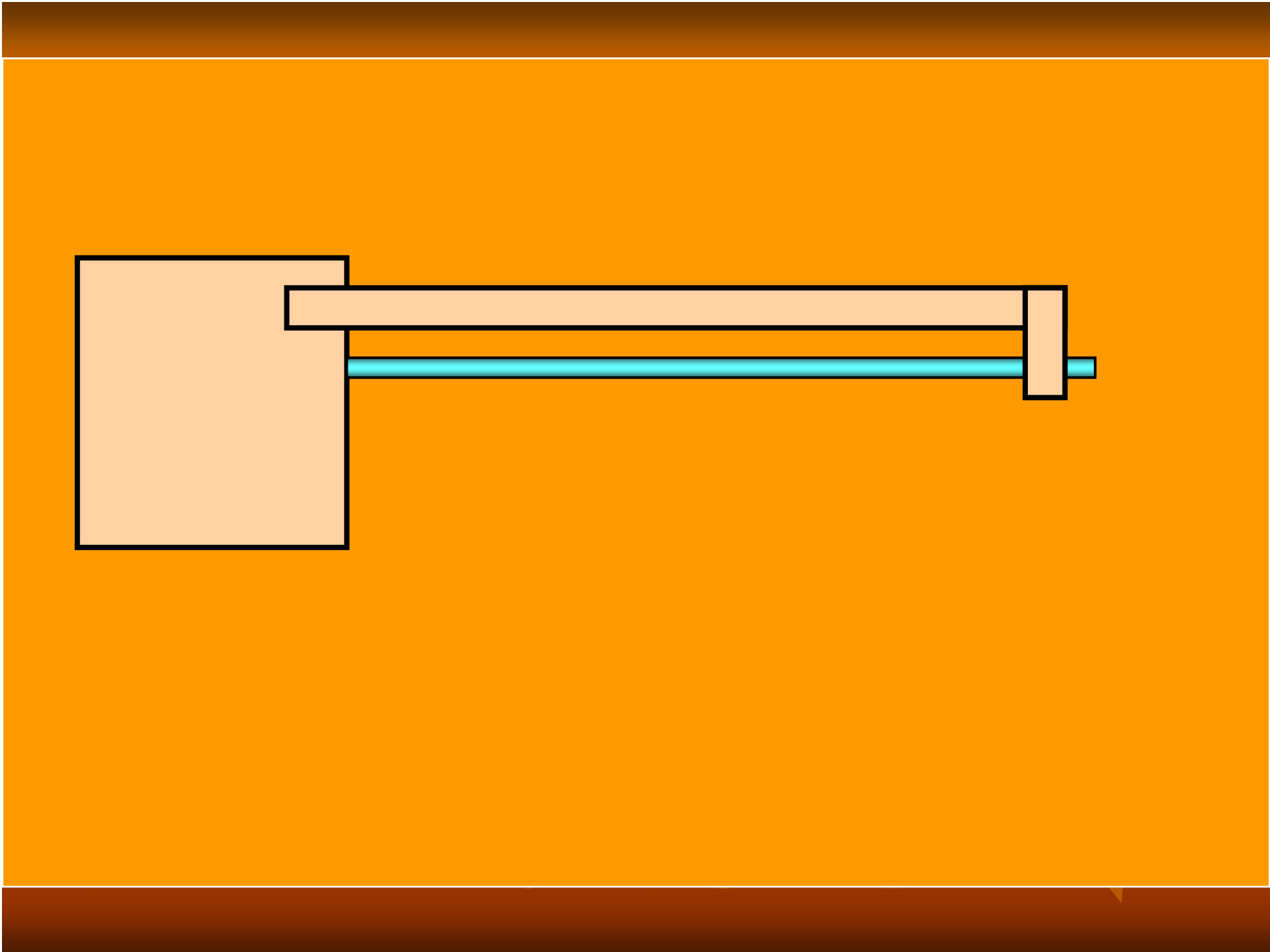




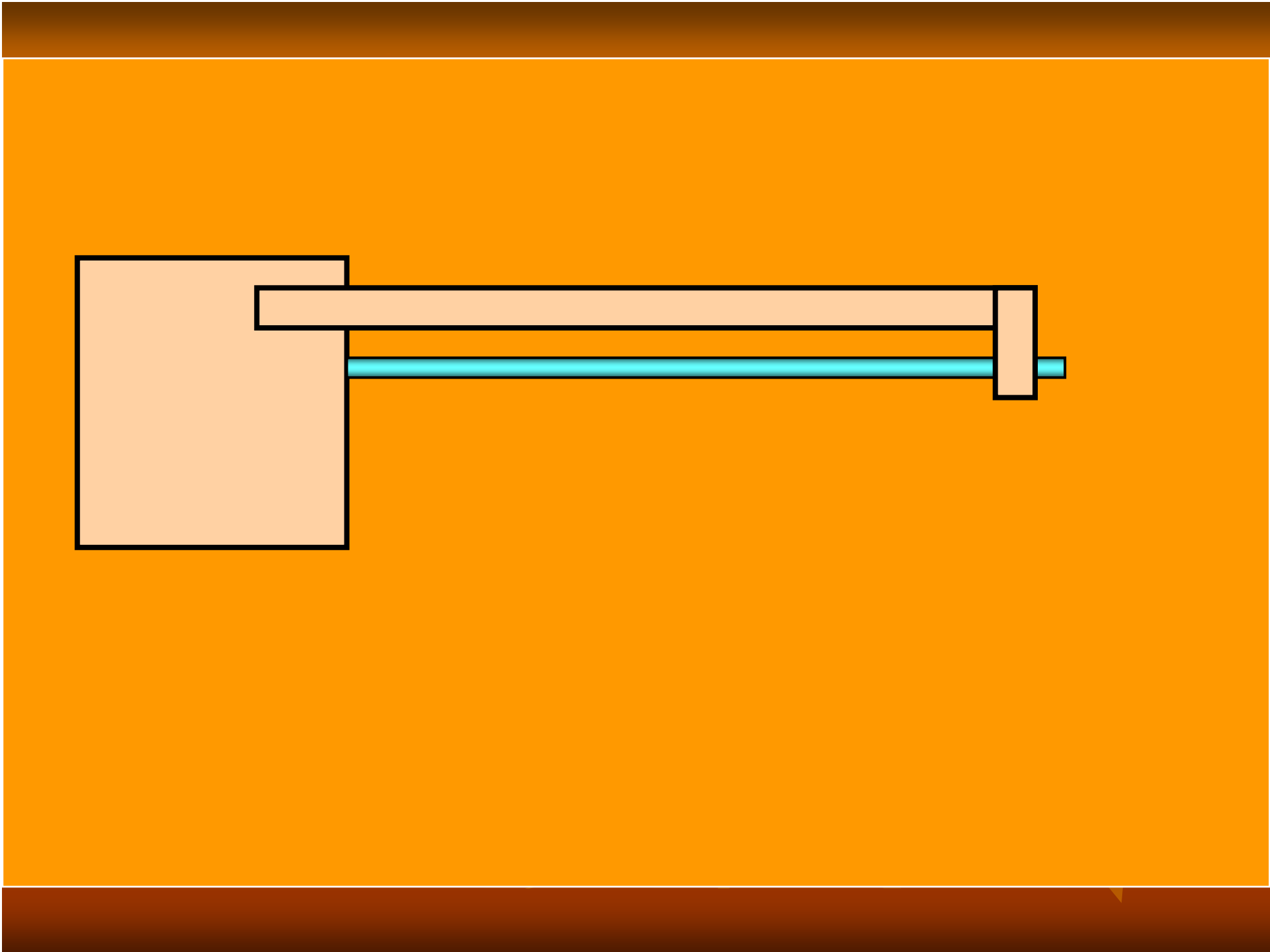


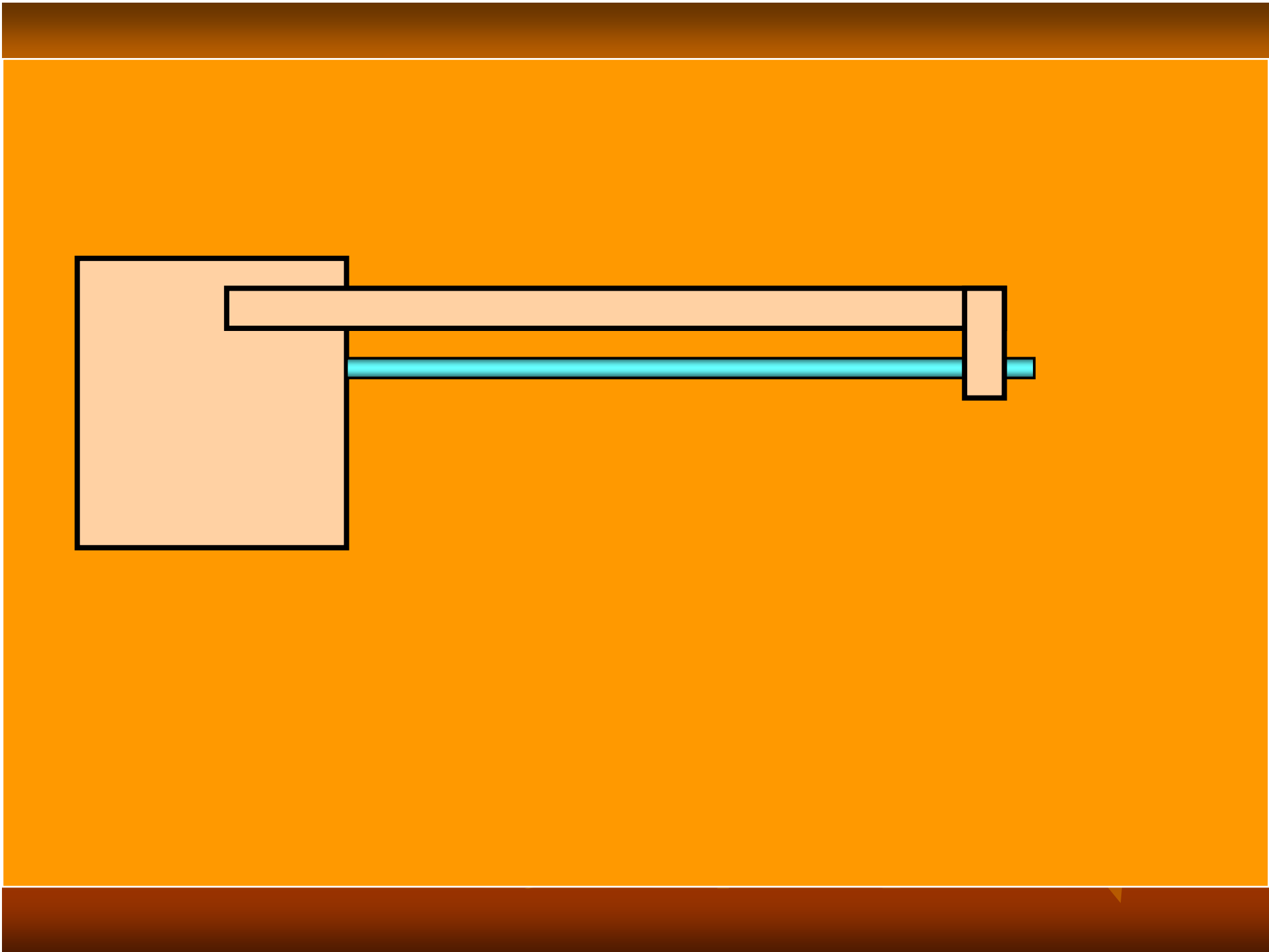


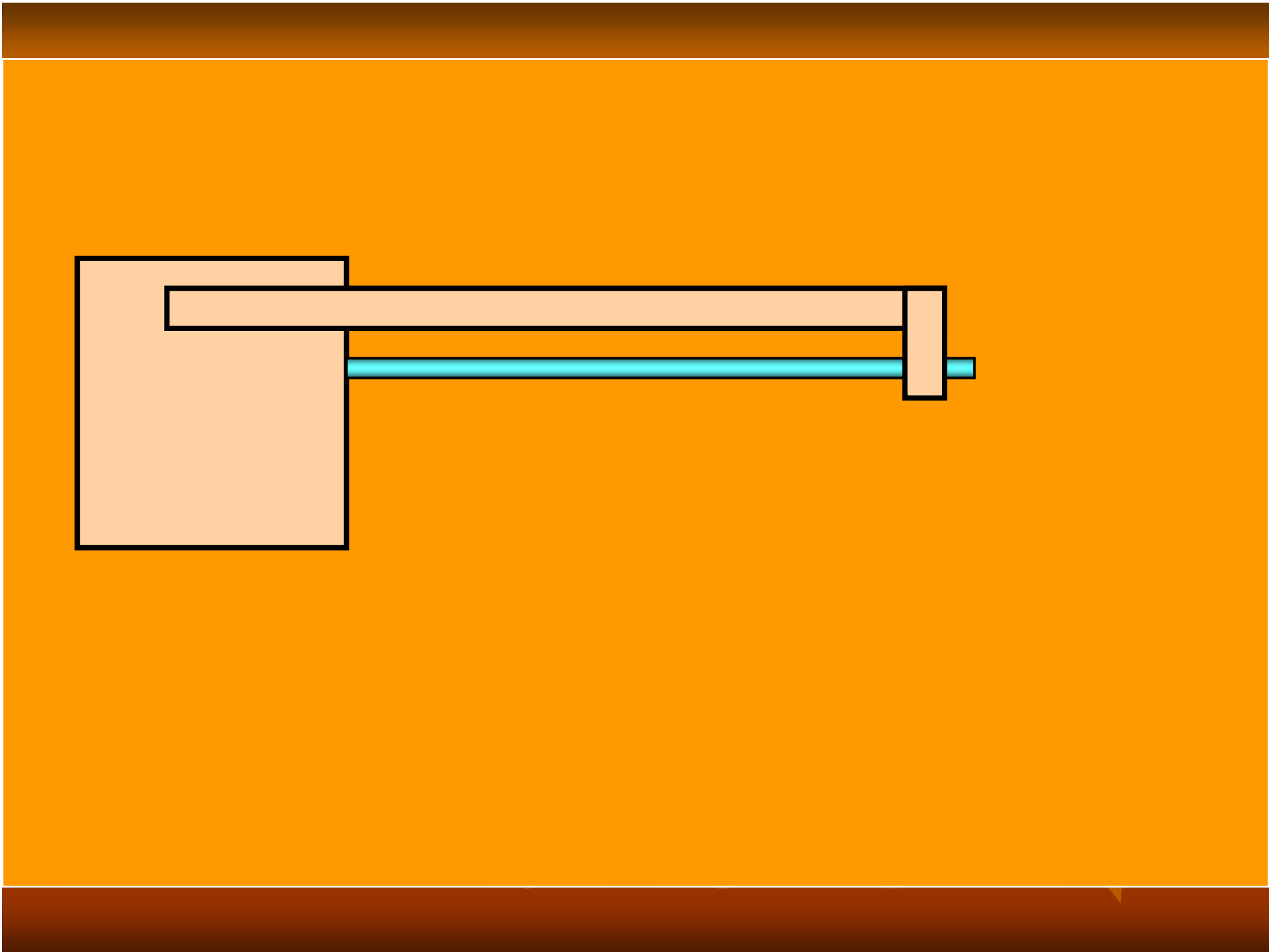


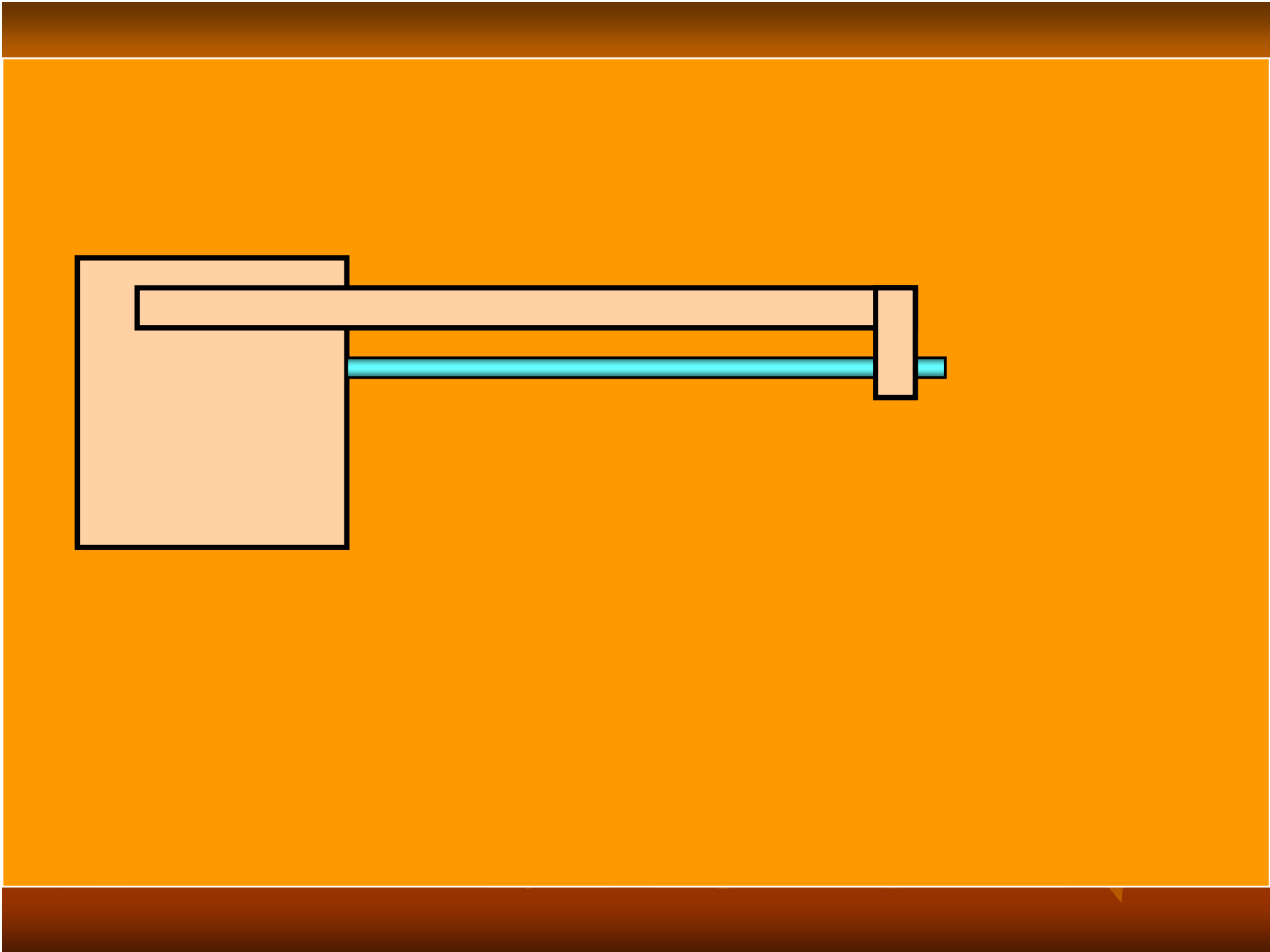


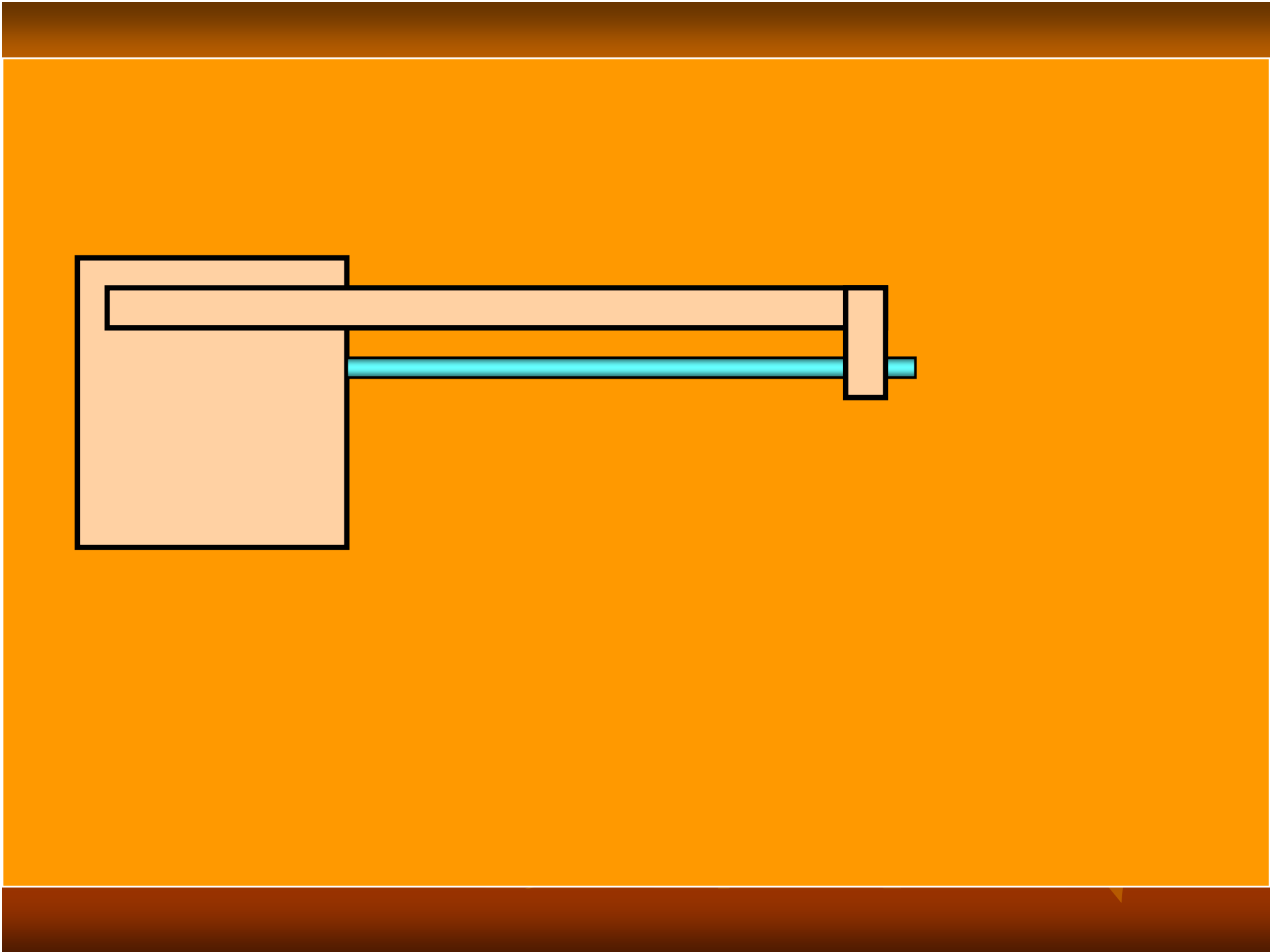


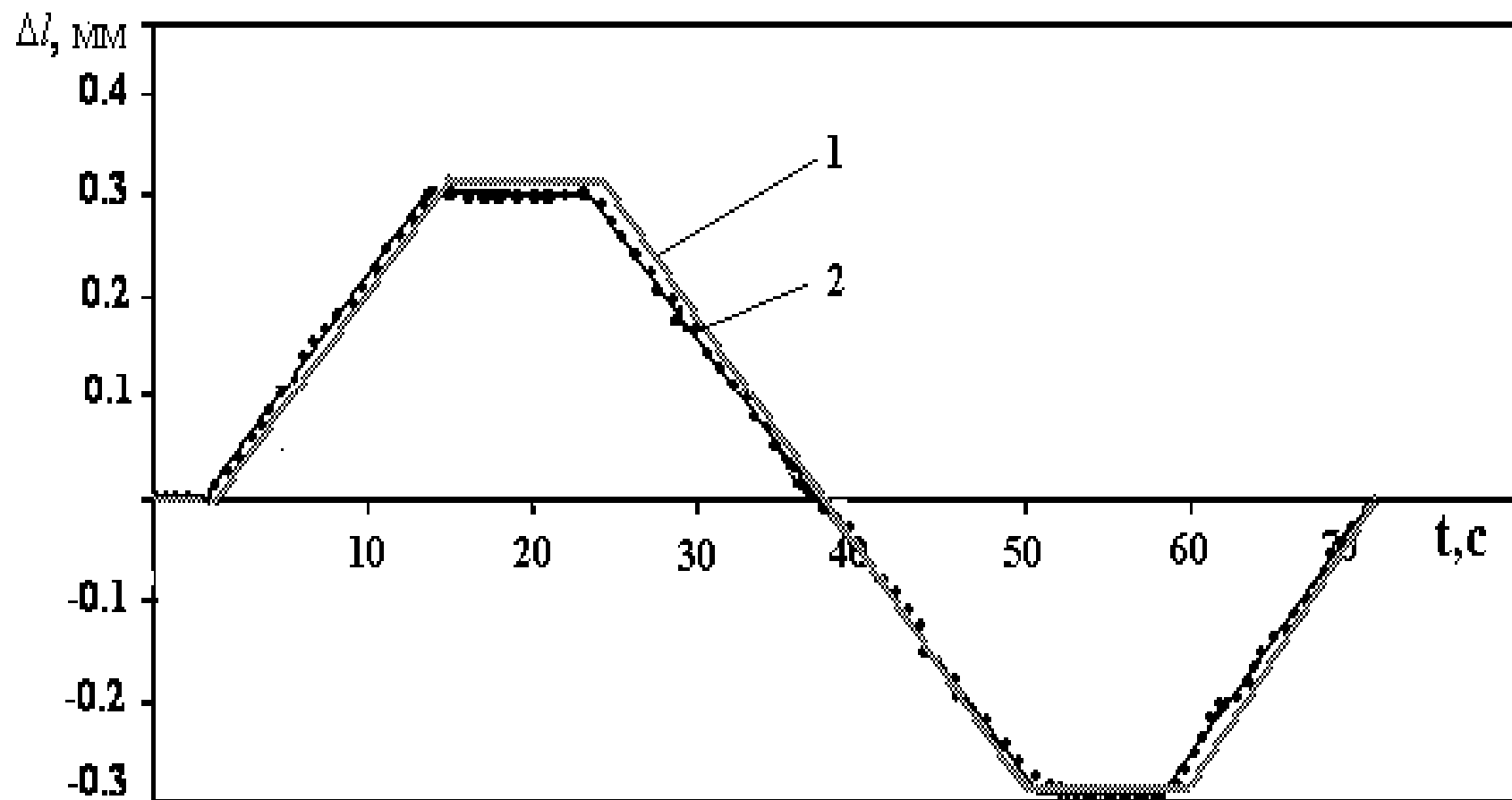












*Зависимости изменения длины ВС от времени: 1 – измеренная при помощи микрометра, 2 – измеренная корреляционным методом.*

# Протяженный измеритель удлинения на основе ОМИ и ПЗС



погрешность измерений  $\pm 3$  мкм

предел измерений  $0 \div 5$  см

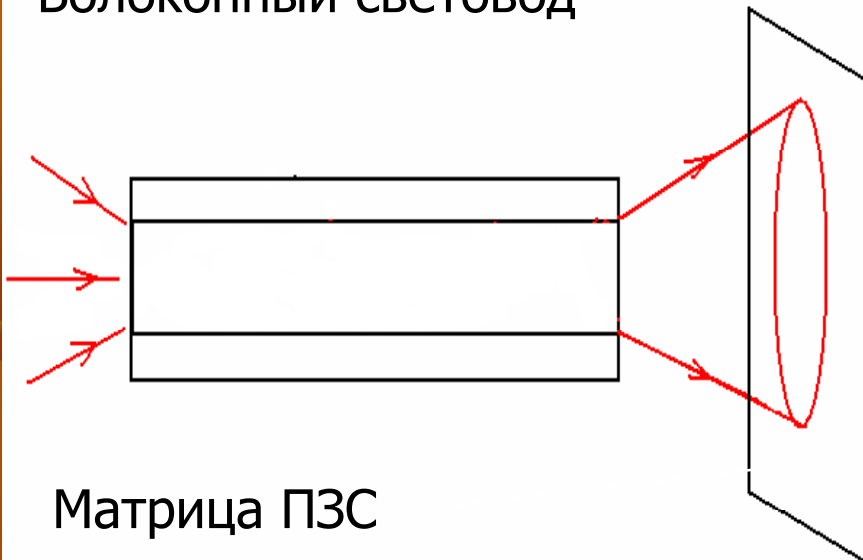
динамический диапазон измерений  
80 дБ

температурная погрешность  
измерений относительного  
удлинения световода  
 $7,3 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}$

частотный диапазон –  $0 \div 25$  Гц

# Одноволоконный многомодовый интерферометр с малым числом мод

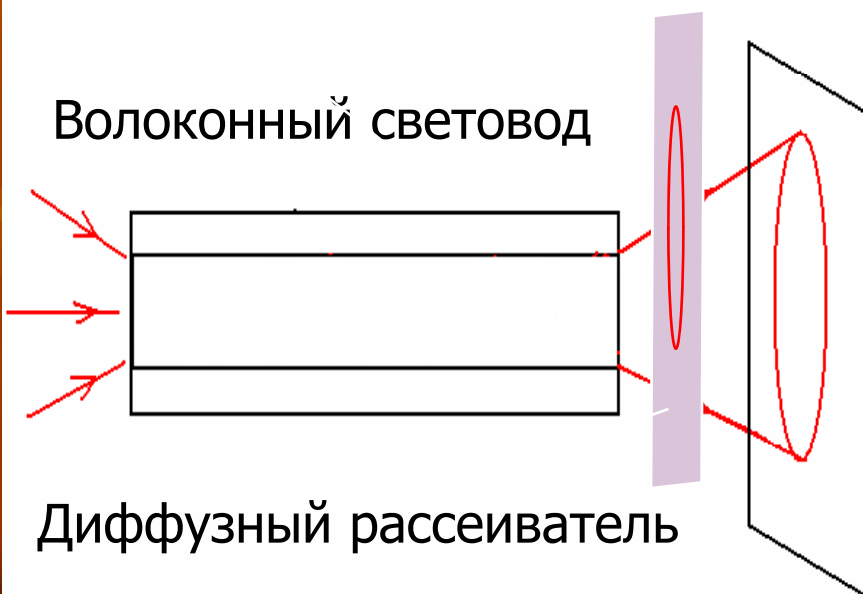
Волоконный световод



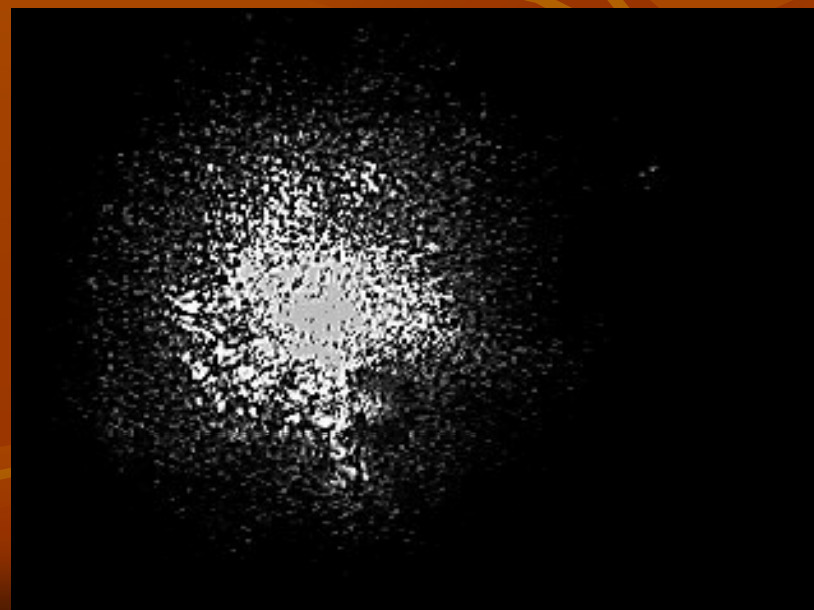
Матрица ПЗС



Волоконный световод



Диффузный рассеиватель





Зависимость коэффициента корреляции спекловых полей от удлинения волоконного световода, работающего в режиме возбуждения малого числа мод

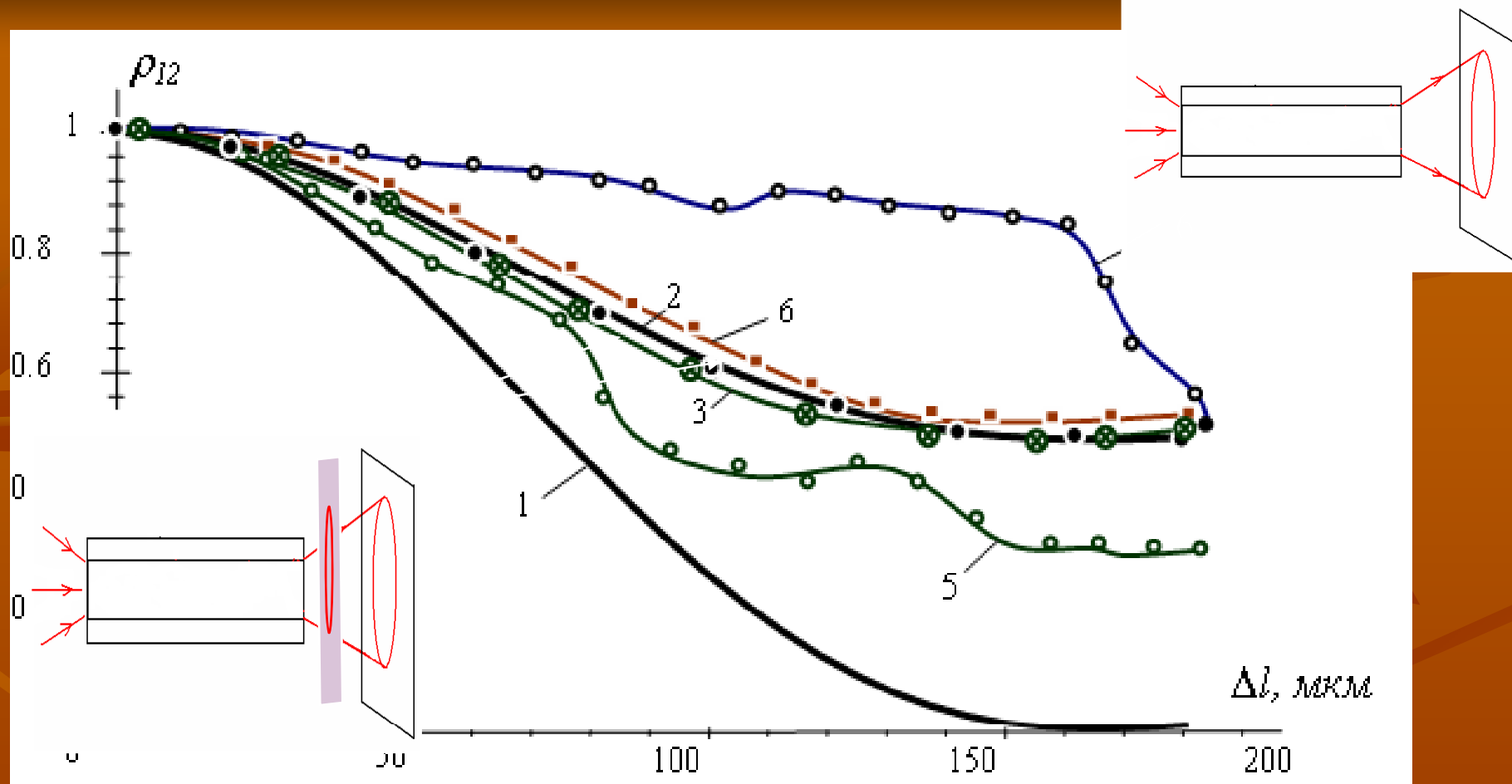
$$\rho_{12} = \frac{\left| \sum_{m=1}^N P_m \exp(i\delta\varphi_m) \right|^2}{\left( \sum_{m=1}^N P_m \right)^2}$$

где  $\delta\varphi_m$  - приращение фазы  $m$ -й моды

$P_m$  - мощность, переносимая  $m$ -й модой

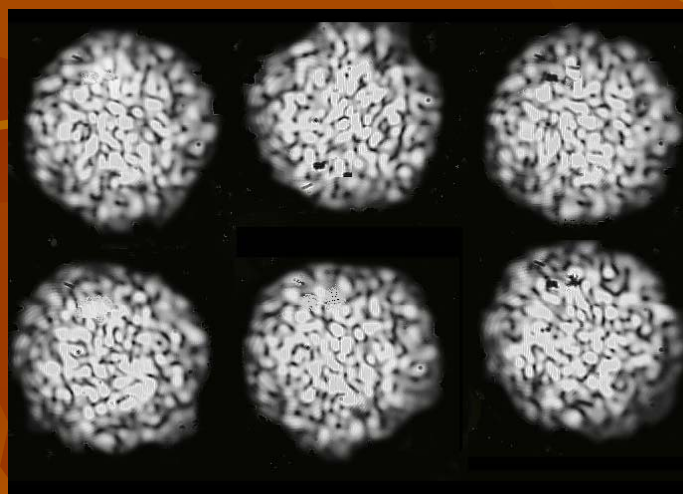
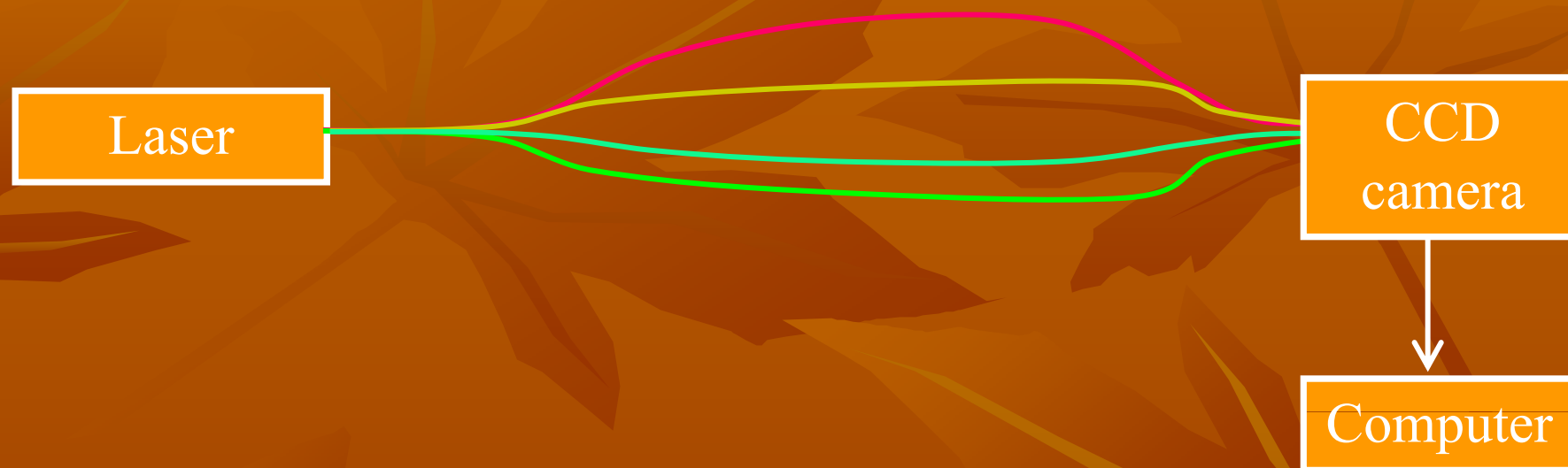
$$\delta\varphi_m = k \left( \frac{dn_m}{dl} + n_m \right) dl$$

$n_m$  - показатель преломления  $m$ -й моды



Зависимость  $\rho_{12}(\Delta l)$ : 1 – расчетная кривая, 2,3 – экспериментальные кривые, полученные при прохождении излучения через диффузный рассеиватель, 4, 5 – экспериментальные кривые, полученные без использования диффузора при непосредственном освещении ПЗС излучением световода, 6 – экспериментальная кривая, полученная при усреднении результатов большого числа измерений, выполненных без использования диффузора.

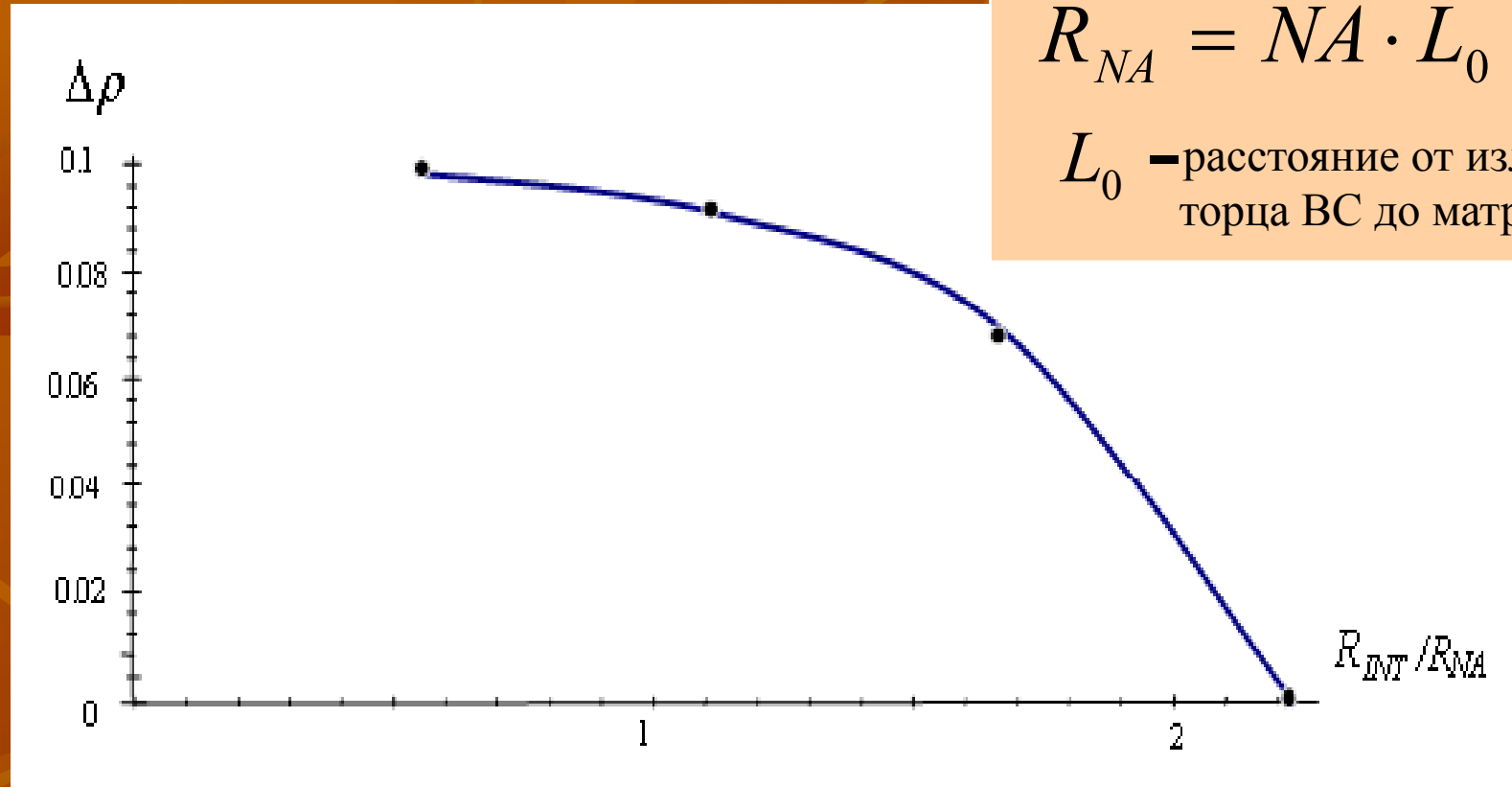
# Многоканальные системы на основе ОМИ



$$R_{INT} \approx 2,2R_{NA}$$

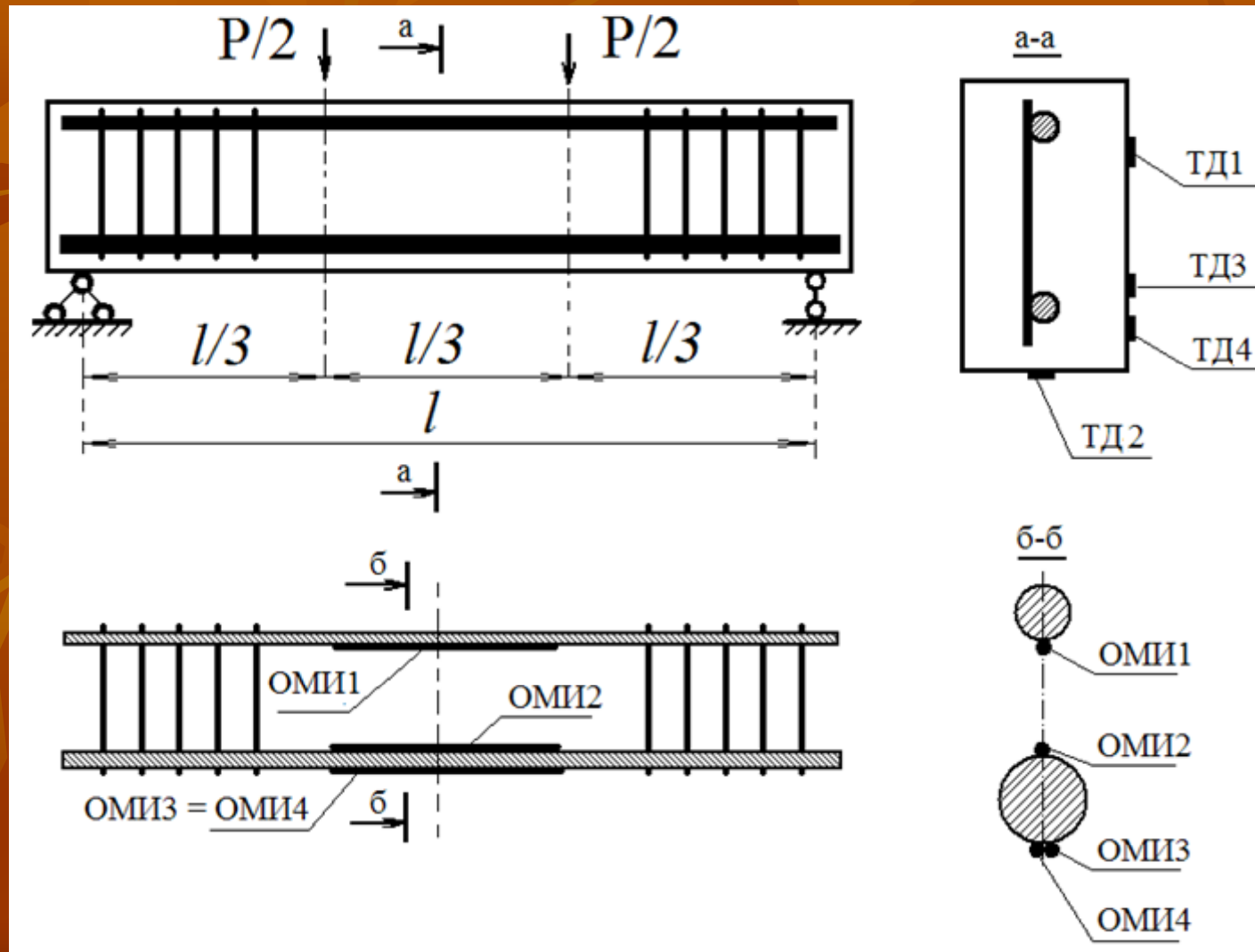
$$R_{NA} = NA \cdot L_0$$

$L_0$  — расстояние от излучающего торца ВС до матрицы ПЗС

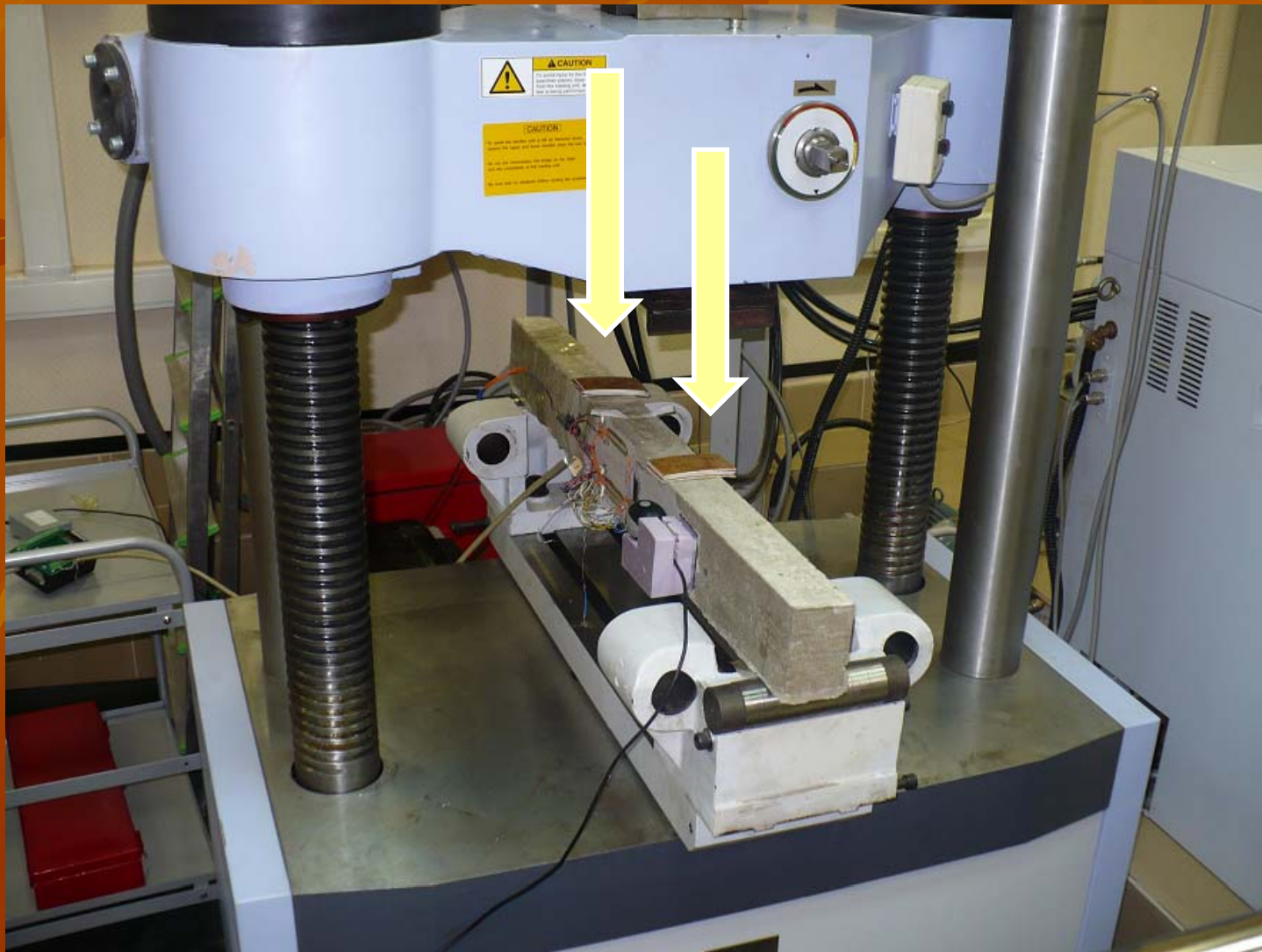


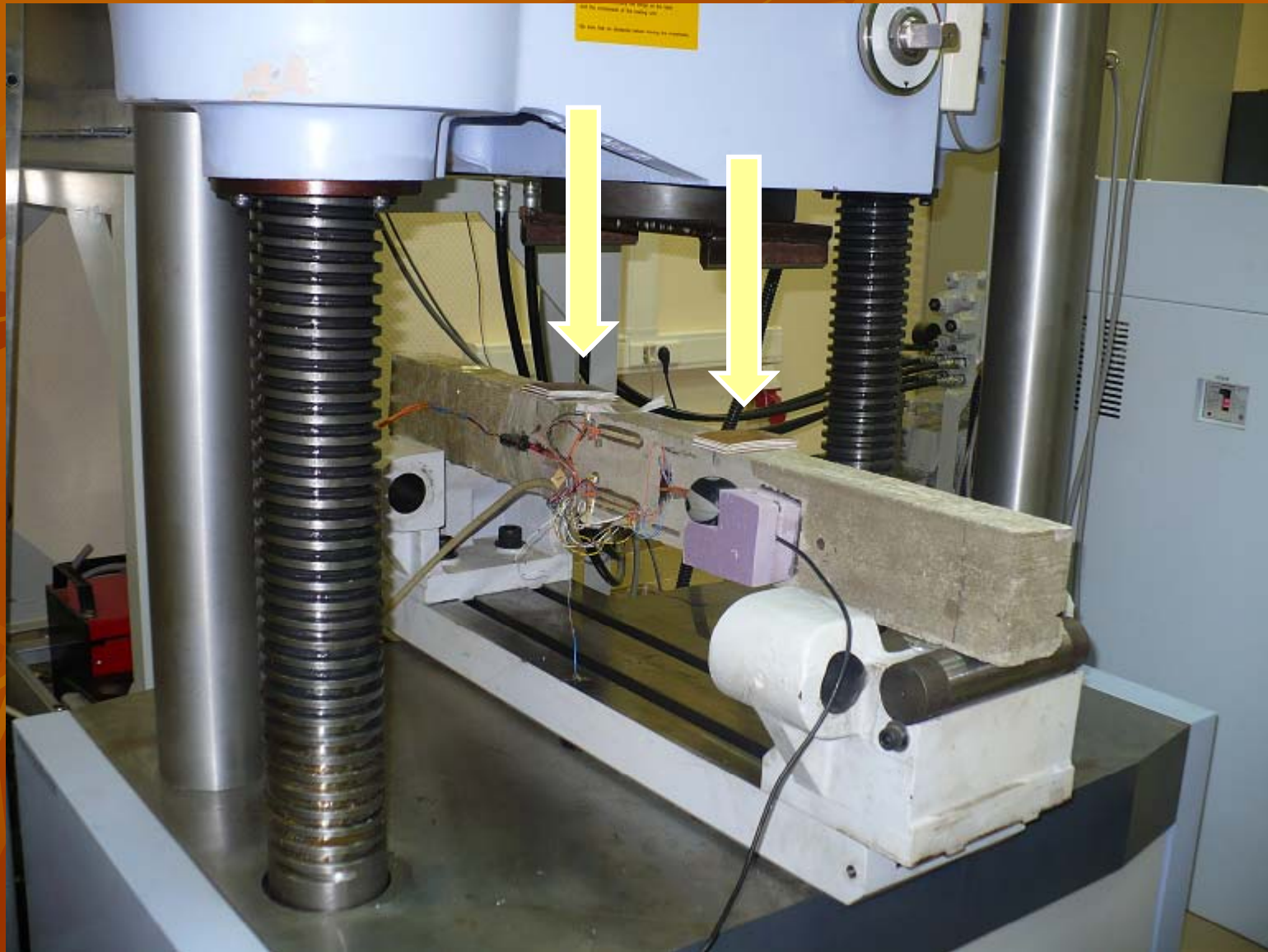
*Зависимость коэффициента взаимодействия от расстояния между центрами изображений соседних спекл-картин*

Взаимное расположение измерительных преобразователей на поверхности арматуры (ОМИ) и внешней поверхности балки (тензодатчики ТД)

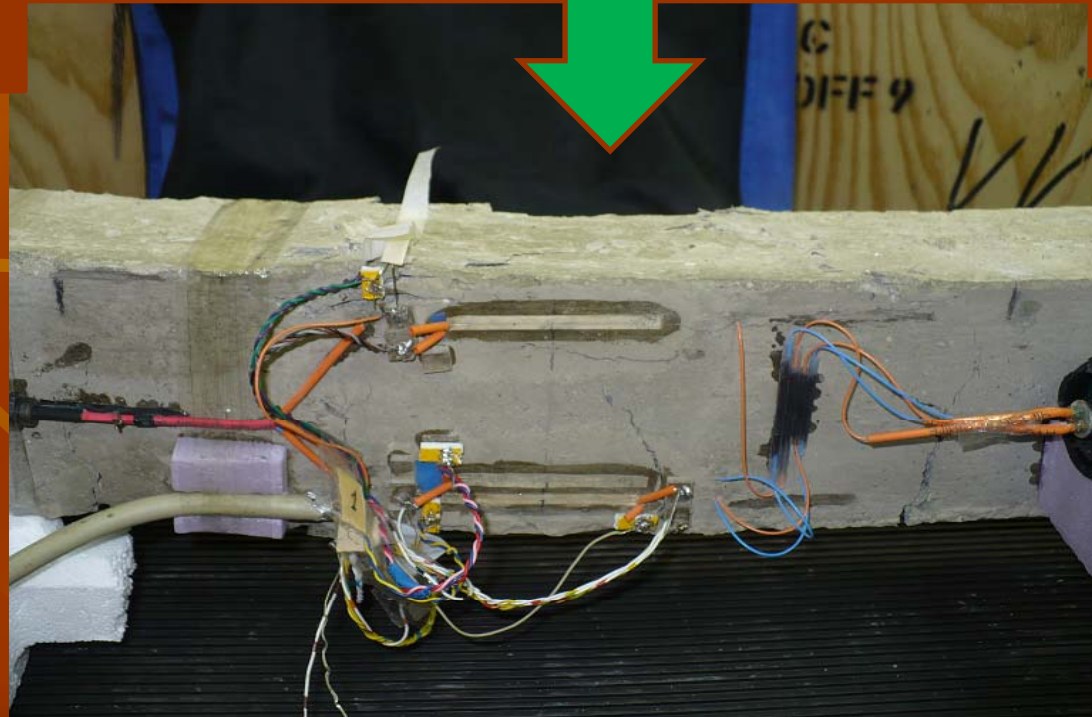
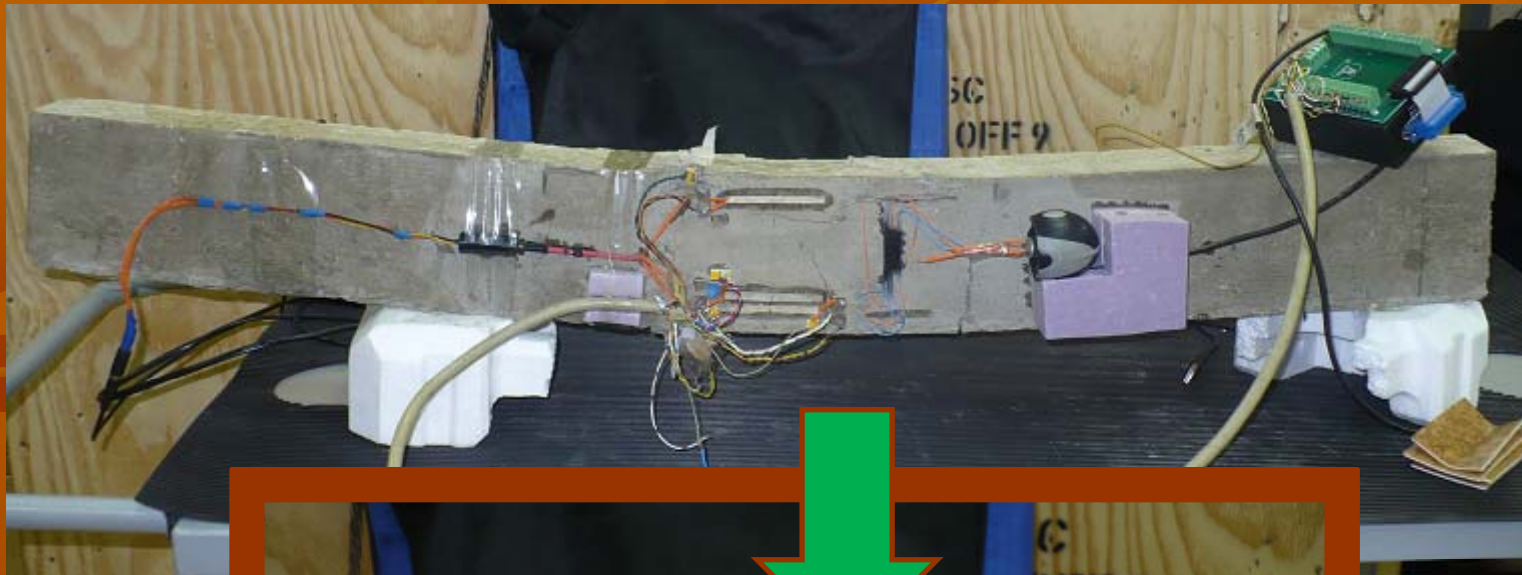


Проведение экспериментальных исследований при помощи разрывной машины (стрелками показаны точки приложения нагрузки)



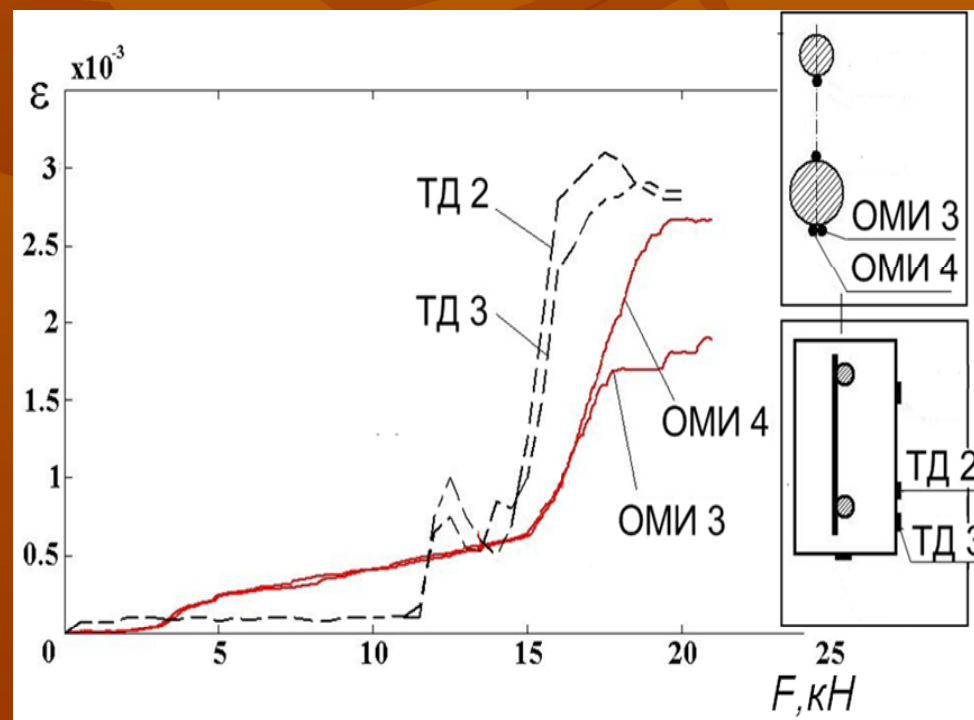
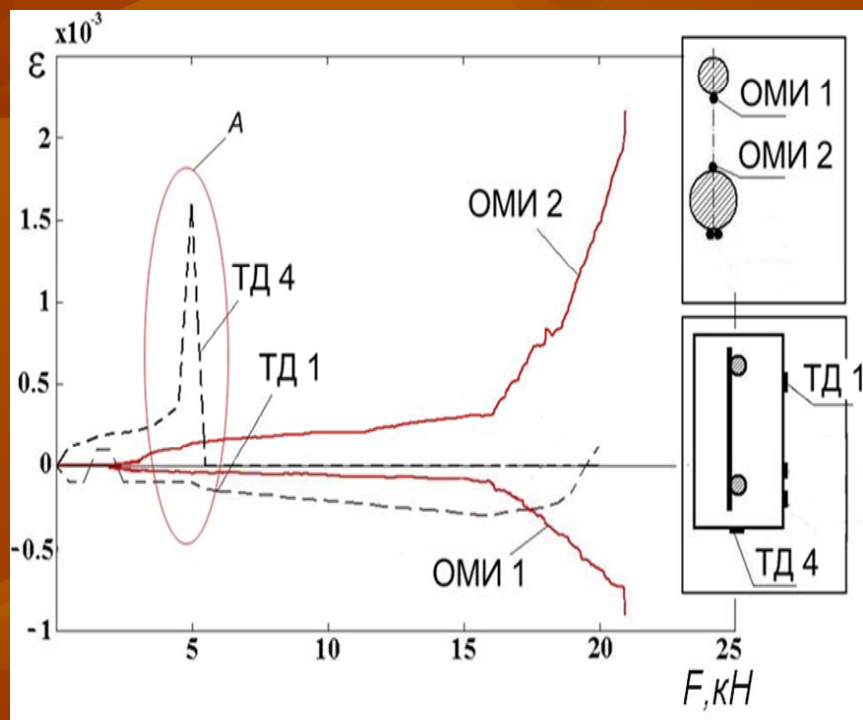


## Разрушенная под действием нагрузки балка

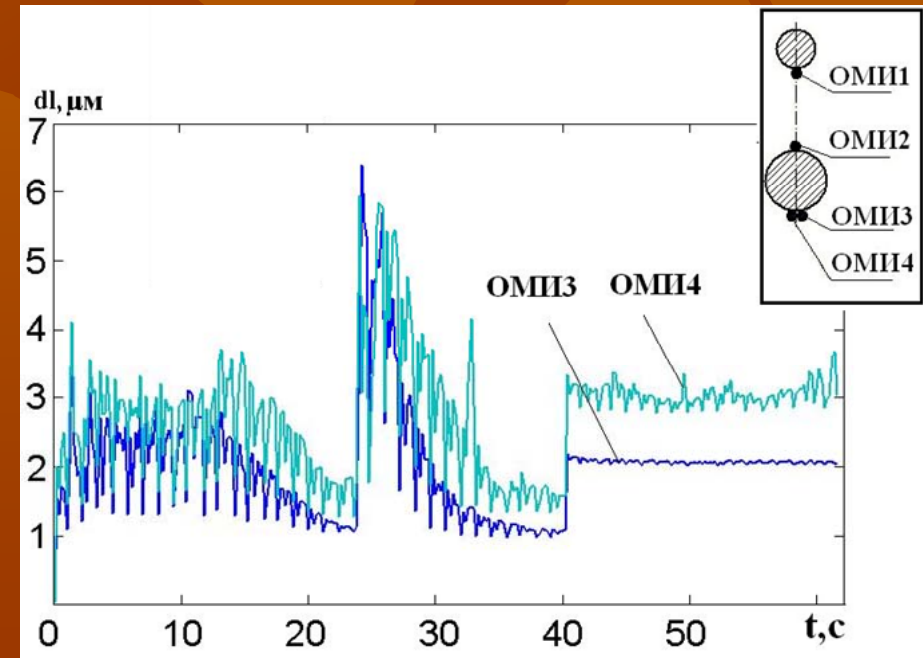
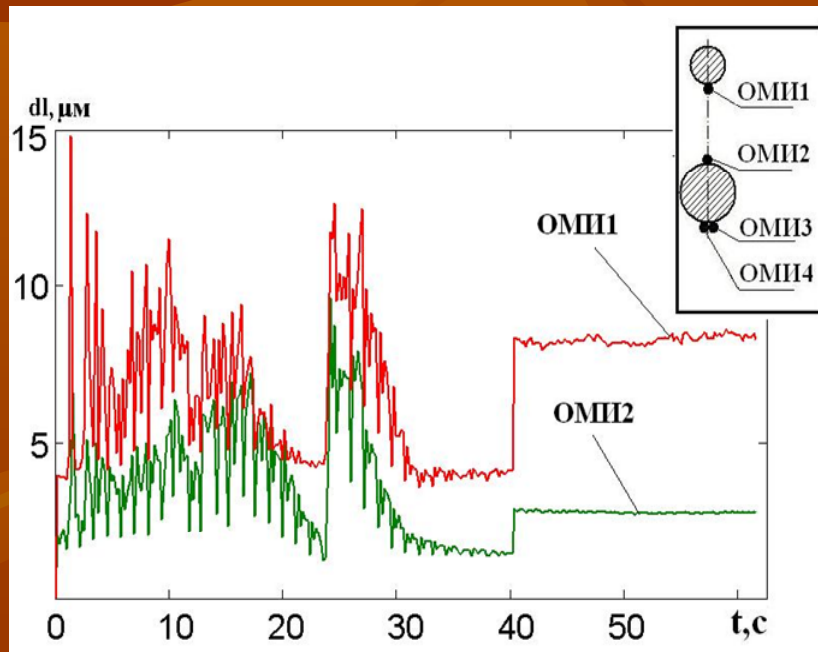




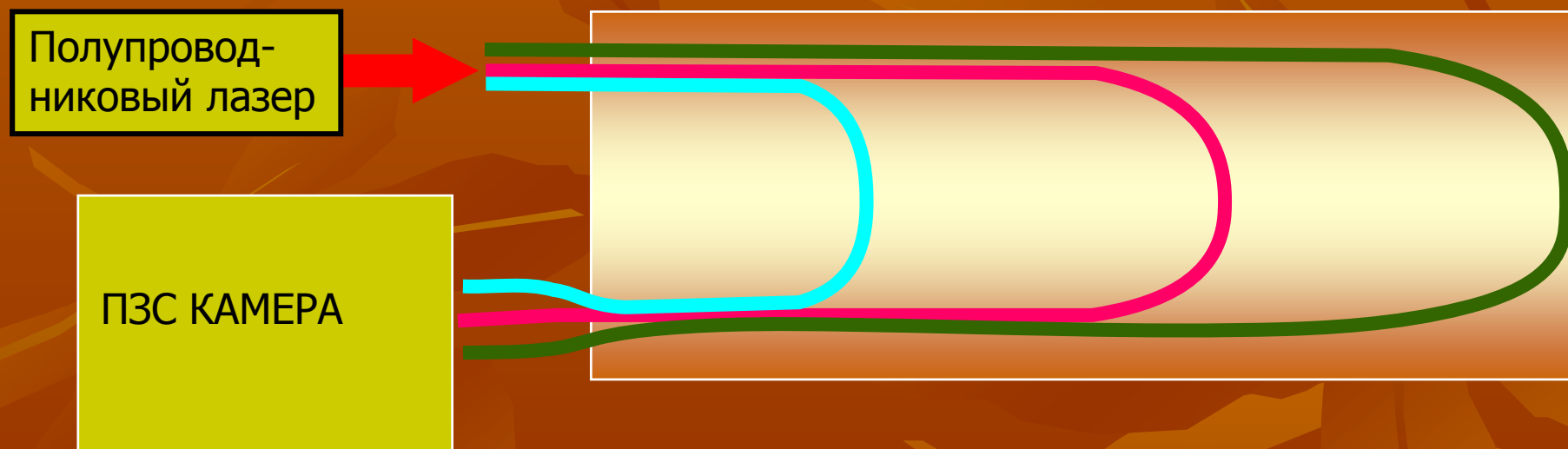
# Результаты экспериментальных исследований процесса нагружения балки



# Результаты экспериментальных исследований процесса нагружения балки



# 1D Волоконо-оптическая томографическая система

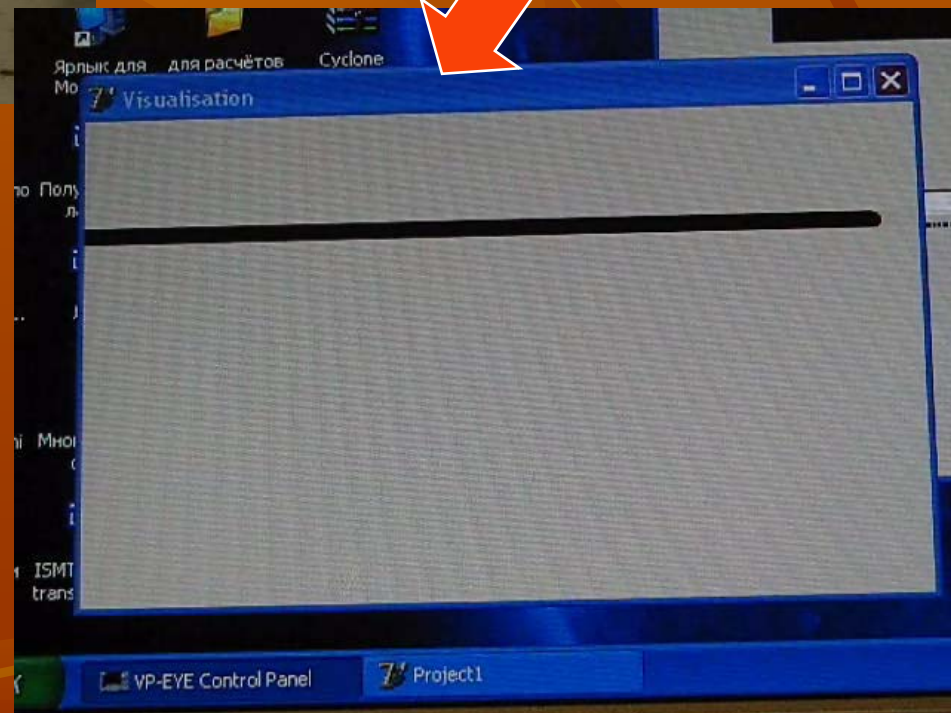


# 1D Волоконо- оптическая томографическая система

Восстановление поля деформации

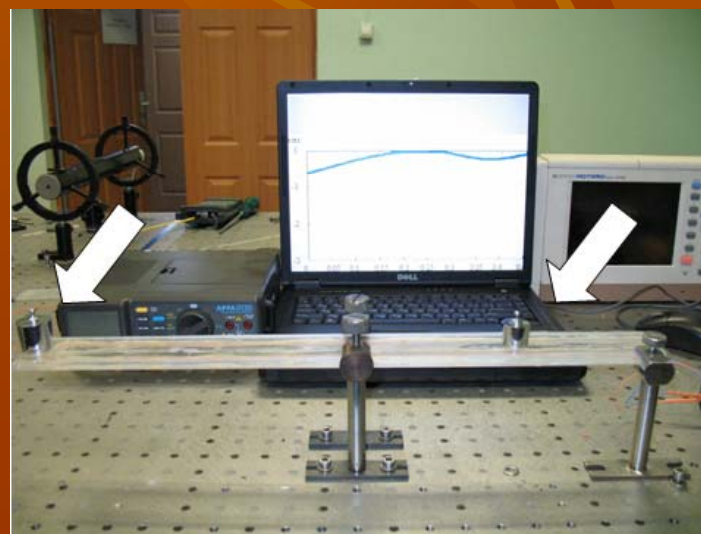
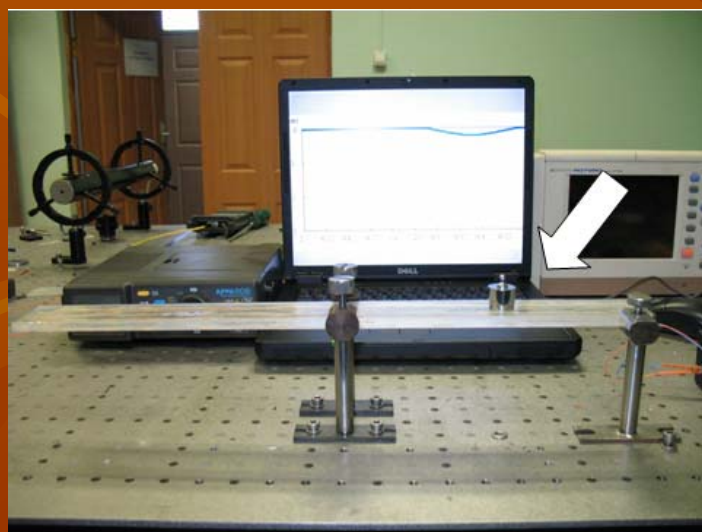


Упругая балка





Восстановление распределения поля деформации упругой балки



# Проблемы на пути внедрения распределенных информационно- измерительных сетей и систем

- разработка методов привязки к рельефу и масштабирования многоканальных и распределенных систем на основе ОМИ;
- разработка методов инсталляции многоканальных и распределенных систем на основе ОМИ на поверхности или в объеме сложных технологических объектов;
- разработка более эффективных методов стабилизации рабочих характеристик ОМИ, входящих в состав многоканальных и распределенных систем ;