

*Региональная научно-практическая конференция  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Все грани математики и механики»  
20 апреля 2019 г, Пермь*

# **Структура конвективного течения вблизи источников тепла различной геометрической формы**

*И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, М.М. Гончаров*  
[lab907@yandex.ru](mailto:lab907@yandex.ru)

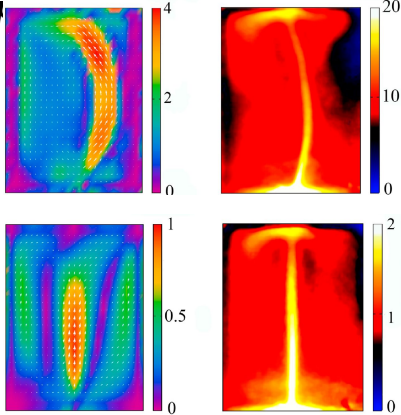


*Кафедра общей физики.  
Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, Пермь*

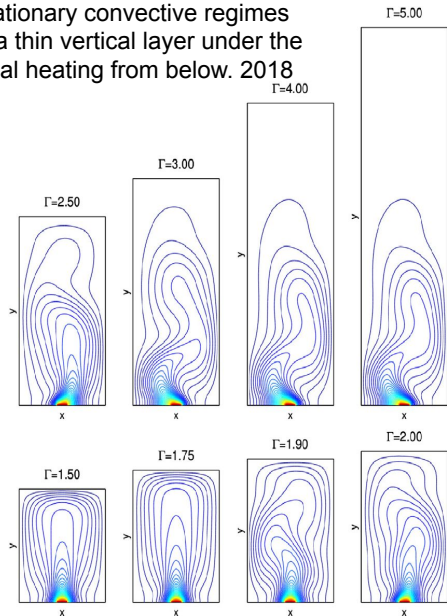


# Актуальность

## Спонтанная потеря устойчивости конвективной струи

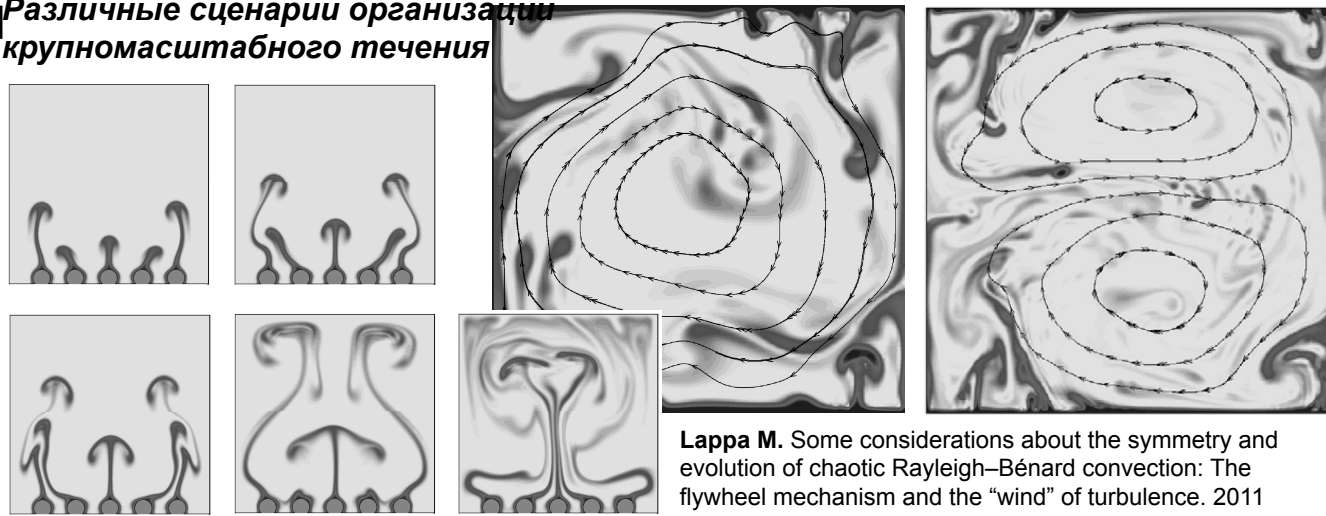


**Kondrashov A., Burkova E.** Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below. 2018



**Hernandez R.H.** Natural convection in thermal plumes emerging from a single heat source. 2015

## Различные сценарии организации крупномасштабного течения



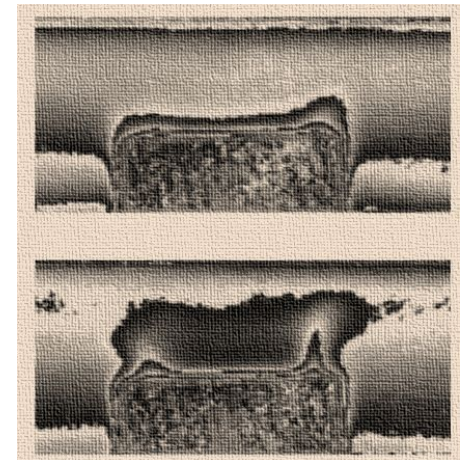
**Lappa M.** Single- and multi-droplet configurations out of thermodynamic equilibrium: Pulsating, traveling, and erratic fluid-dynamic instabilities. 2007

**Lappa M.** Some considerations about the symmetry and evolution of chaotic Rayleigh-Bénard convection: The flywheel mechanism and the "wind" of turbulence. 2011

## Структура пограничного слоя вблизи поверхности локализованного источника тепла



**Martynenko O. G., Khrantsov P. P.** Free-convective heat transfer: with many photographs of flows and heat exchange. 2005.



**Maruyama S. et al.** Description of the adhesive crystal growth under normal and micro-gravity conditions employing experimental and numerical approaches. 2002



# Цели и

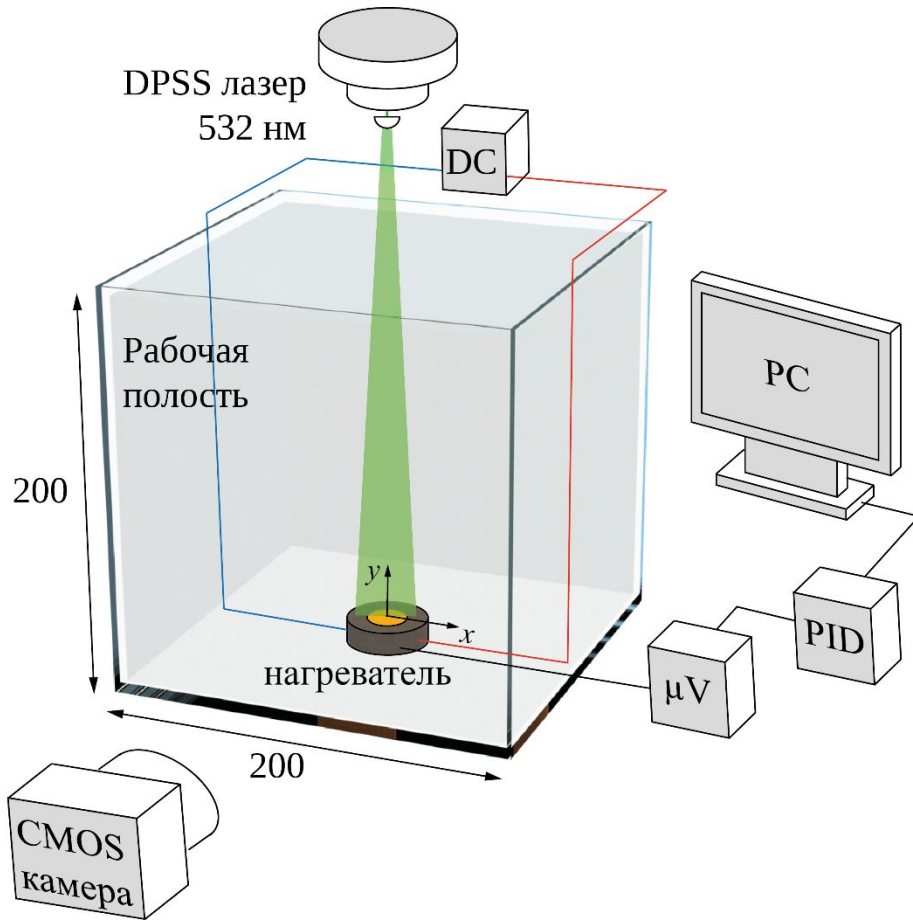
## задачи

**Описать способы организации конвективного течения, вызванного локализованными источниками тепла, и сценарии развития теплового факела.**

Основное внимание уделено решению следующих задач:

- 1) Разработка и верификация численной модели;
- 2) Исследование структуры температурного и скоростного полей в плоскости осевого сечения цилиндрического слоя жидкости. Классификация режимов конвекции над нагревателем круглой формы при различной интенсивности подогрева. Составление диаграммы конвективных режимов;
- 3) Исследование структуры течения, создаваемых компактными источниками тепла в форме правильных многоугольников.

# Описание экспериментальной установки



**Рис.1.** Общая схема экспериментальной установки:

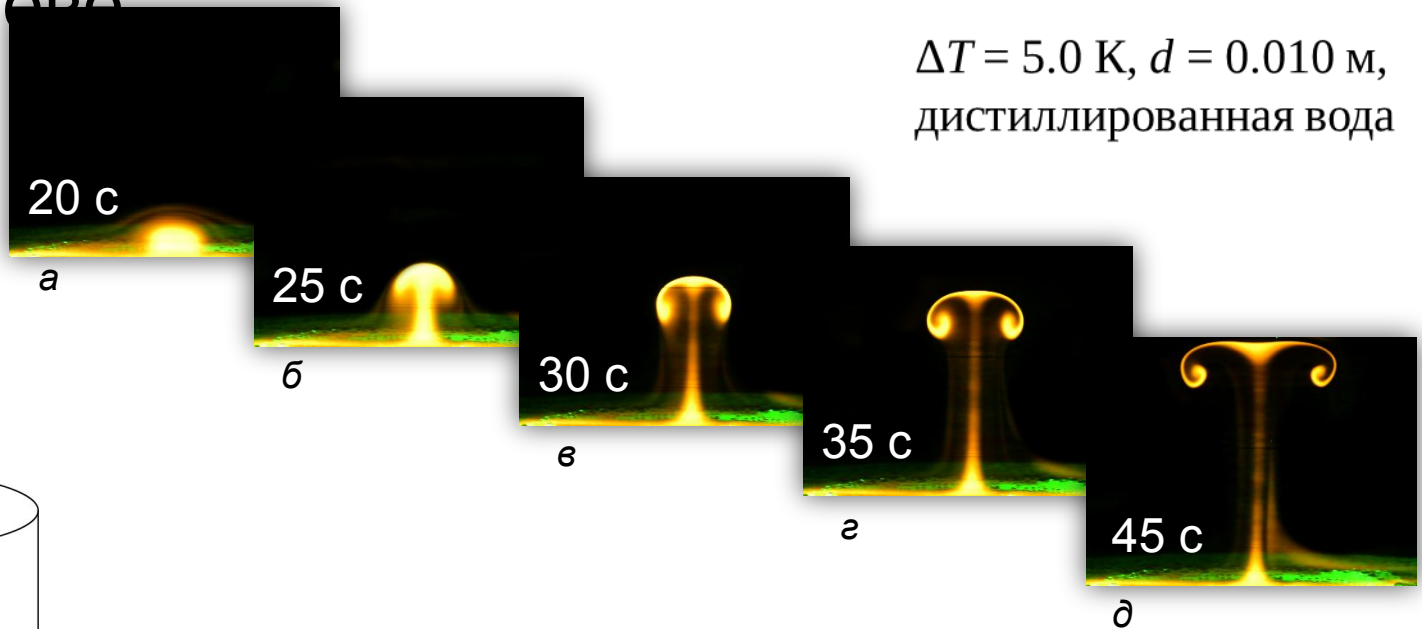
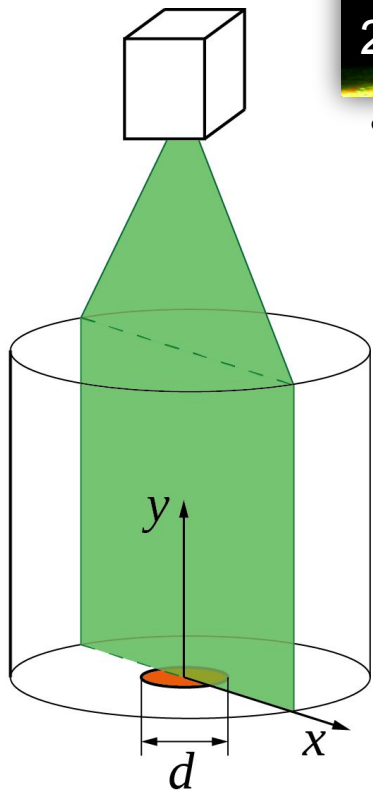
- кубическая рабочая полость с компактным нагревателем (диаметр  $\ll$  высоты полости);
  - микровольтметр (период опроса 4 Гц);
  - микроконтроллер для поддержания требуемой температуры подогрева;
  - источник постоянного тока;
  - компьютер;
  - лазерный нож (532 нм);
  - цифровая фотокамера (съемка 3 к/с)
- Рабочая жидкость:**  
 дистиллированная вода  
 $(T_0 = 297 \text{ K}, \sigma = 6.9, \rho_0 = 0.97 \text{ г/см}^3)$

**Краситель:**  
 подкрашенный флуоресцирующим веществом трехпроцентный водный раствор глицерина  
 $(\rho_2 = 1.05 - 1.10 \text{ г/см}^3)$

**Трассеры:**  
 светорассеивающие полиамидные частицы  
 $(\rho_1 = 1.05 \text{ г/см}^3)$

# Структура течения при локализованном подогреве

$\Delta T = 5.0 \text{ K}$ ,  $d = 0.010 \text{ м}$ ,  
дистиллированная вода

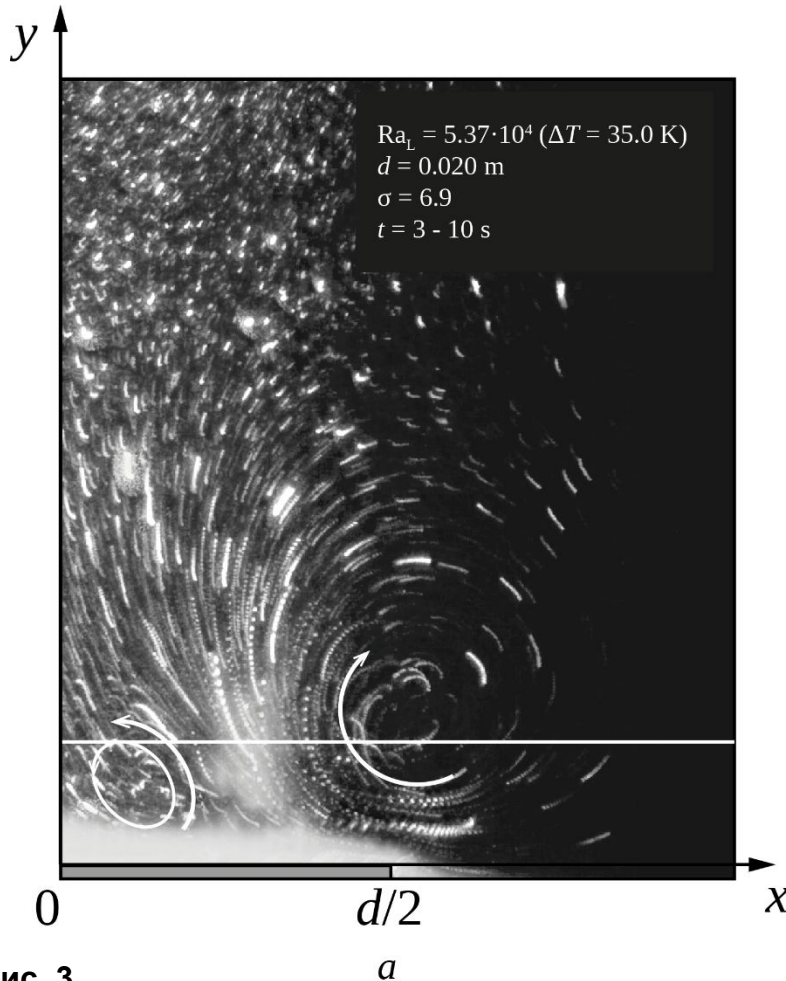


**Рис.2.** Стадии развития осесимметричного конвективного факела. Визуализация структуры течения, возникающего при выделении тепла круглой медной пластиной, обеспечивается благодаря добавлению в жидкость красителя Родамин-В<sup>1</sup>

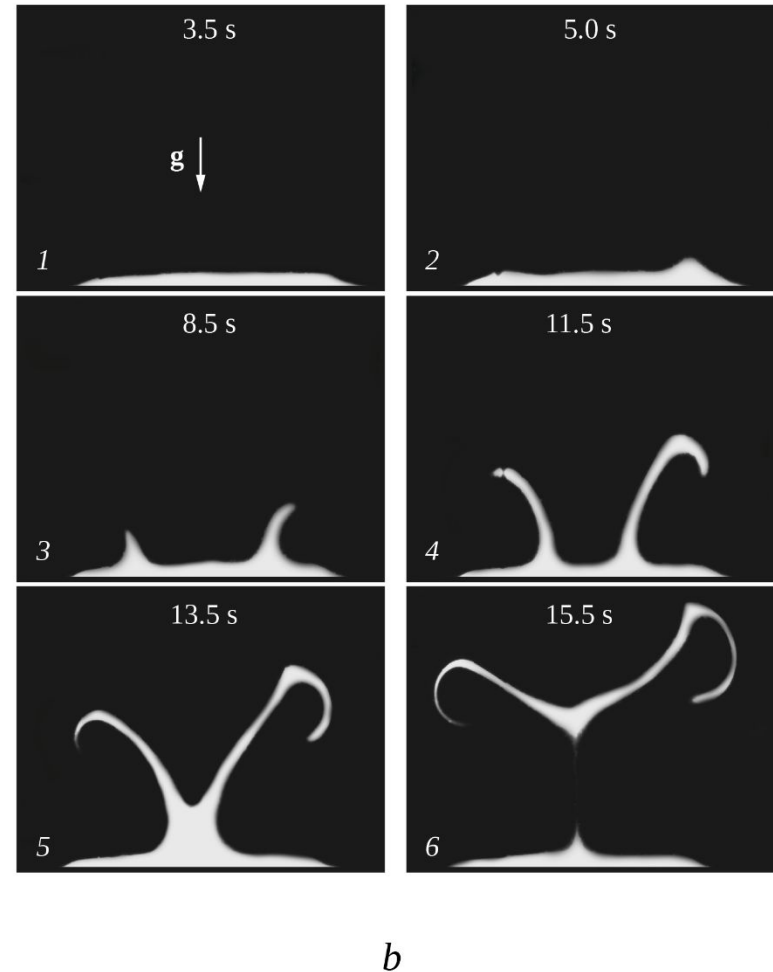
1. Родамин (rhodo- 'rose-coloured' + amine) – вещество из ряда синтетических красителей, полученных из ксантенов. Часто используется в биотехнологиях (флуоресцентная микроскопия) и для цветного текстиля. Обладает свойством флуоресценции (вещество при освещении светом с длиной волны 500–550 нм (зеленый) переизлучает свет в видимом диапазоне, но с длиной волны 570–620 нм (оранжевый)).



# Эффект разделения пограничного слоя

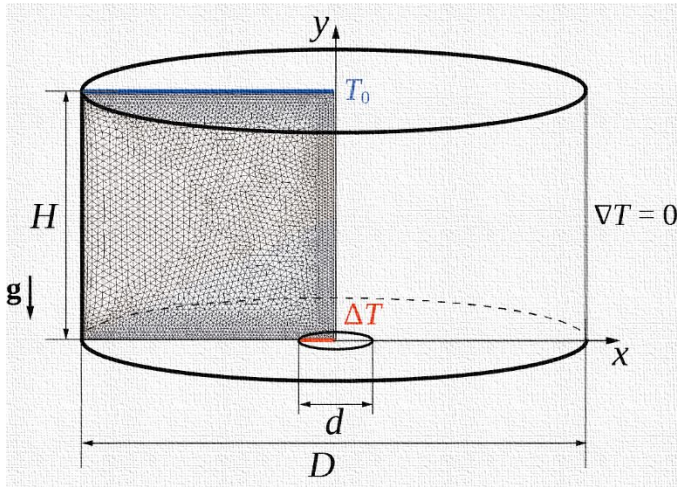


**Рис. 3.**  
**a** – изображение структуры потока над поверхностью круглой медной пластины (частицы). Образование восходящего течения вблизи края нагревателя подтверждает предсказанное численной моделью разрушение пограничного слоя



**b** – этапы развития осесимметричного факела (краситель). Разделившаяся вначале струя со временем объединяется и образует один центральный факел. Поля концентрации и температуры качественно совпадают лишь на начальном этапе (до момента объединения)

# Математическая постановка задачи



Система уравнений тепловой конвекции

Граничные условия

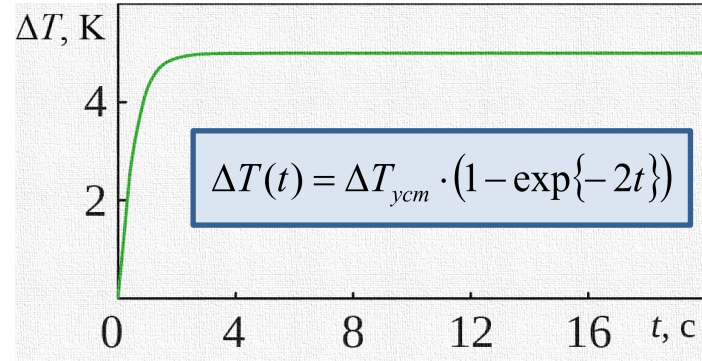
$$\begin{cases} (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta u - g\beta(T - T_0) \\ \rho c_p u \cdot \nabla(T - T_0) = \kappa \Delta(T - T_0) \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = H : T = T_0, u = 0 \\ x^2 + z^2 < d/2 : \Delta T_{ycm} = T_H - T_0 \\ x^2 + z^2 = D/2 : \nabla T = 0, u = 0 \\ y = 0 : u = 0 \end{cases}$$

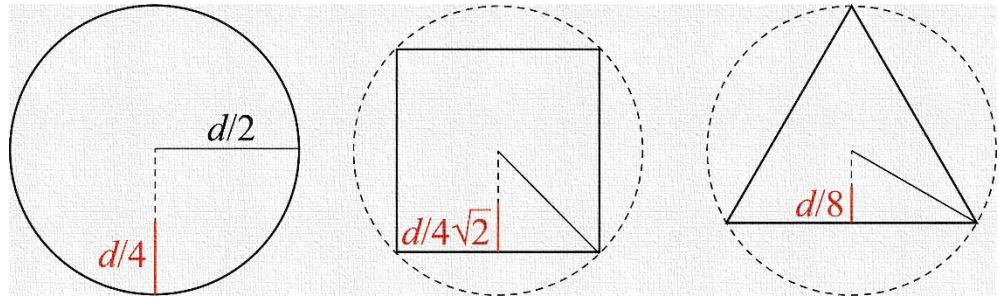
**Рис.4.** Модель цилиндрической замкнутой полости, заполненной идеальной жидкостью. Начало прямоугольной системы координат  $xu$  совпадает с центром круглого источника тепла в нижнем основании полости. Расчетная сетка выбирается нерегулярной (плотность расположения узлов возрастает по мере приближения к оси цилиндра)

Безразмерные управляющие параметры

$$Ra_L = \frac{g\beta\Delta T}{\sigma} \cdot \left(\frac{\rho c_p}{\kappa}\right)^2 (s/m)^3 \quad \sigma = \nu \frac{\rho c_p}{\kappa}$$

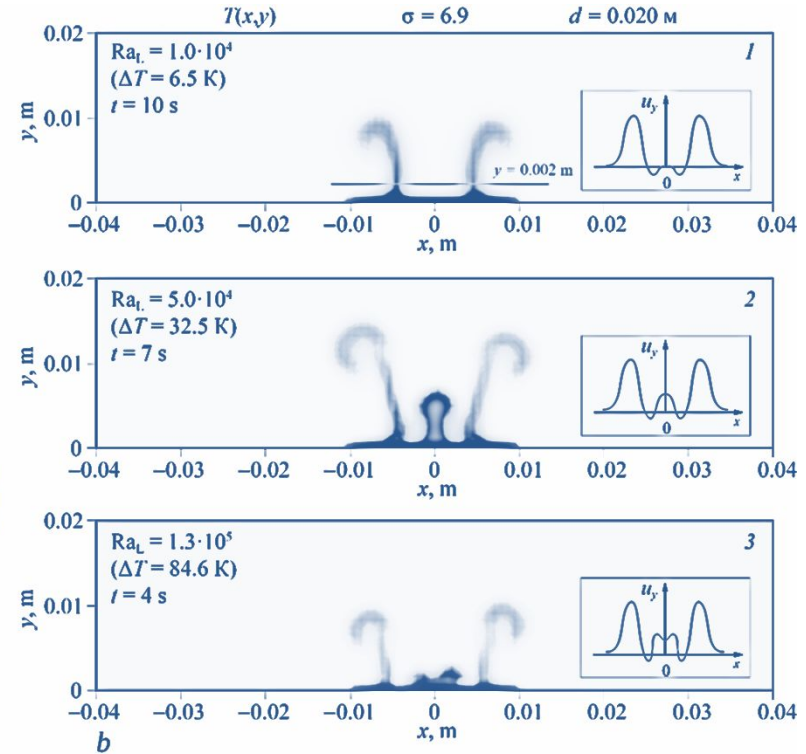
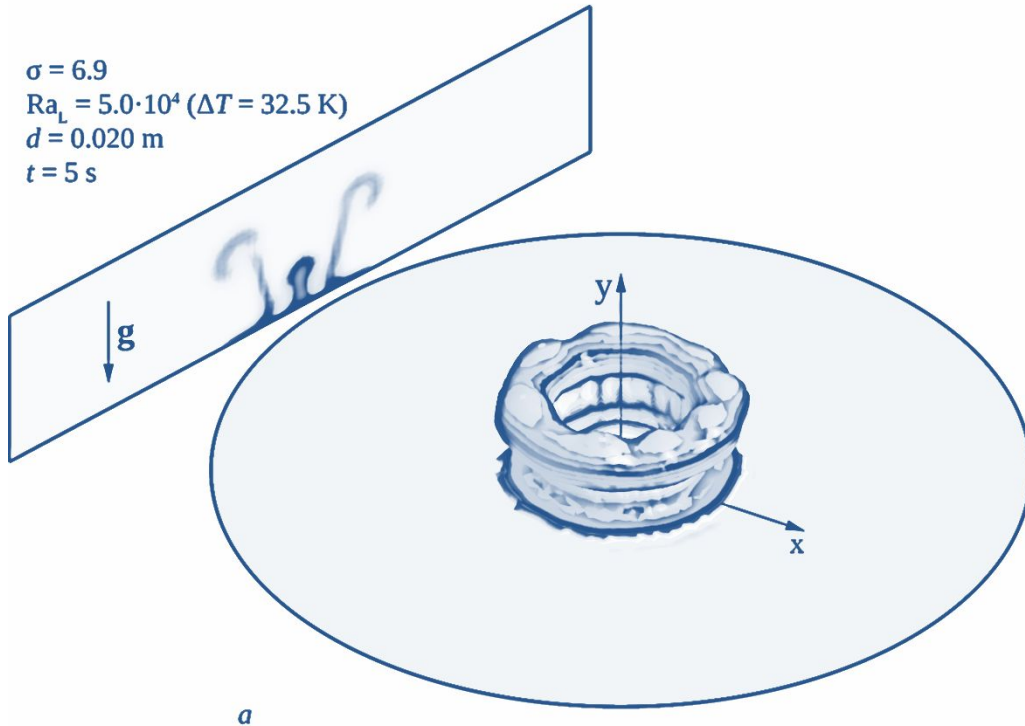


**Рис.5.** Модель постепенного изменения температуры источника (по аналогии с ПИД-регуляцией температуры в натурном эксперименте)



**Рис.6.** За характерный размер в задаче выбирается отношение площади  $s$  поверхности источника тепла к его периметру  $m$

# Поле температуры над круглым нагревателем



**Рис.7.**

**a** – на переднем плане – визуализация трехмерной изотермической поверхности над нагревателем круглой формы;

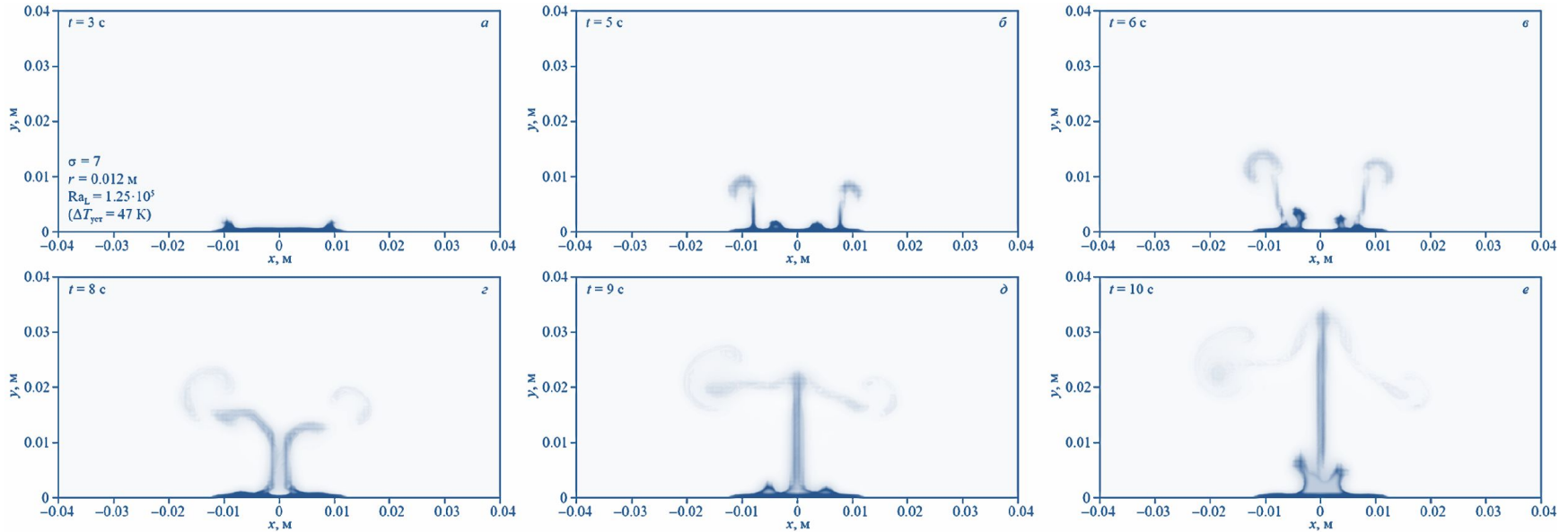
на заднем плане – распределение температуры в плоскости осевого сечения

**b** – мгновенное поле температуры  $T(x,y)$ , которое показывает:  
 1 – пограничный слой вблизи поверхности нагревателя разделен на две струи;  
 2 – в центральной части успевает развиться дополнительный конвективный факел;  
 3 – при более интенсивном подогреве пограничный слой способен деформироваться повторно





# Эволюция $T(x, y)$ при больших числах Рэлея



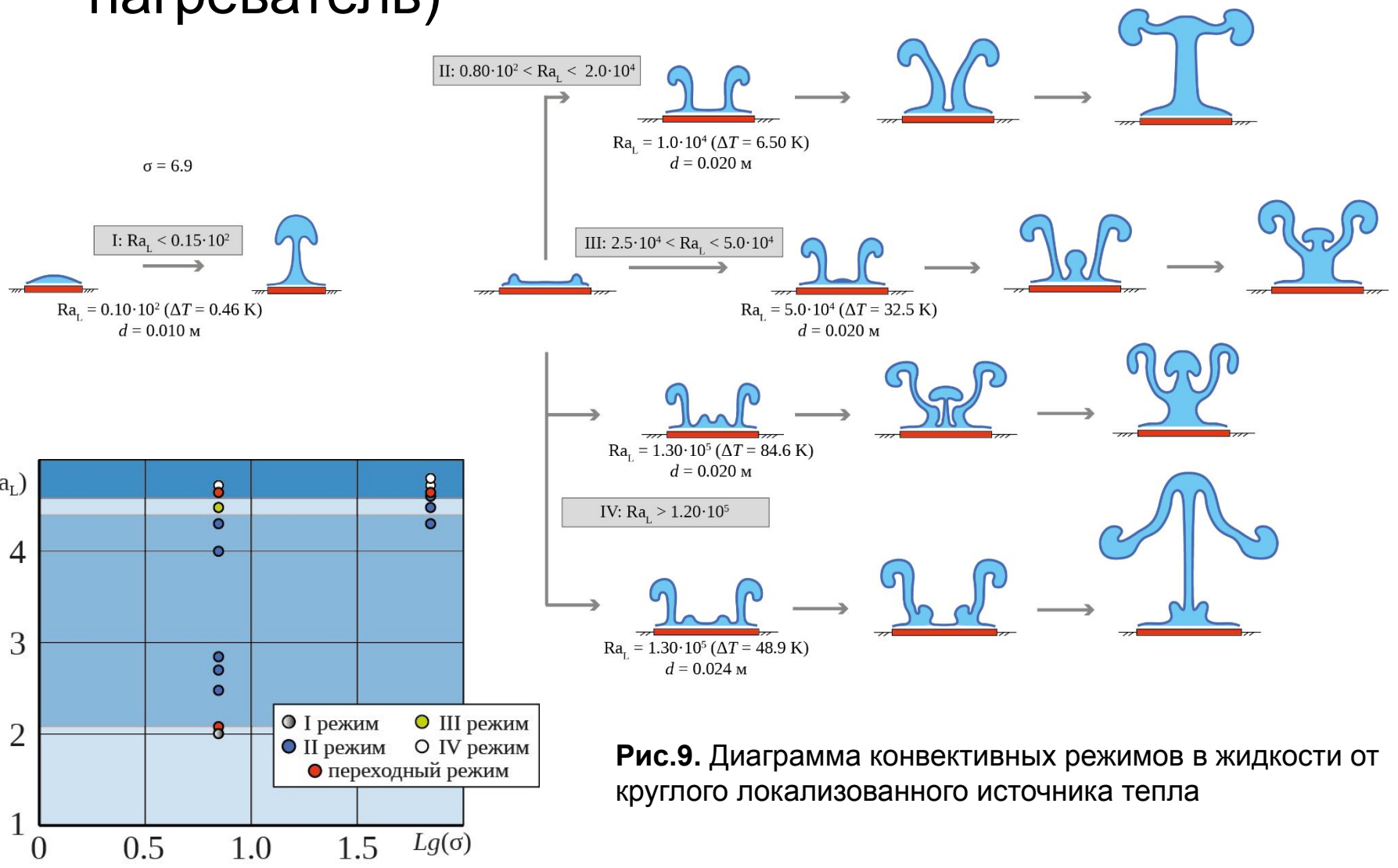
$$Ra_L = 1.25 \cdot 10^5 \quad (\Delta T = 47.0 \text{ К}), \quad d = 0.024 \text{ м}, \quad \sigma = 6.9$$

**Рис.8.** Эволюция поля температуры в плоскости  $x, y$ . Из-за увеличения размера источника тепла при том же числе Рэлея изменяется характер деформации пограничного слоя.

После объединения в единую струю на некотором расстоянии от оси основного факела наблюдается периодическая неустойчивость пограничного слоя

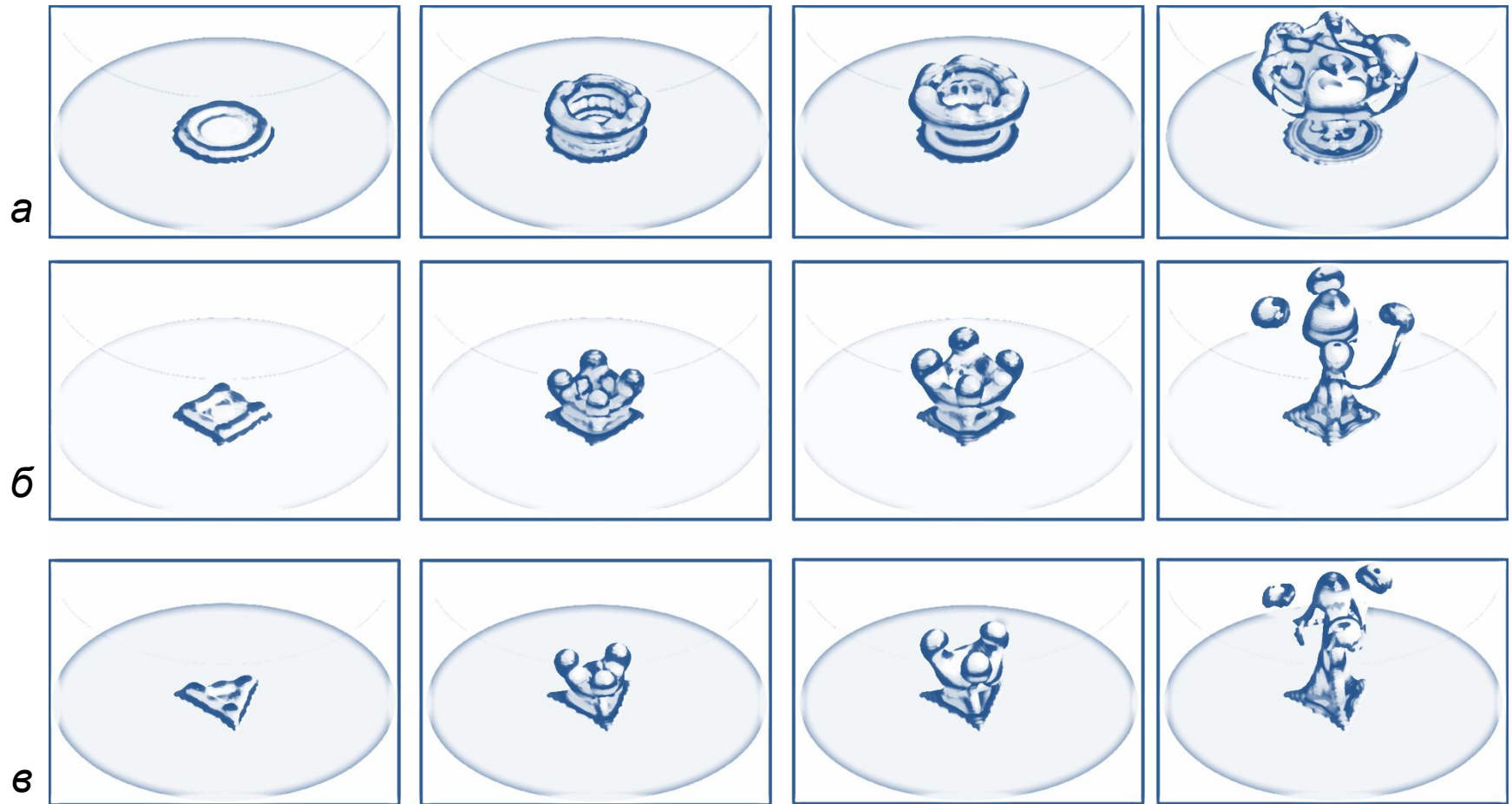
Структура конвективного течения вблизи источников тепла различной геометрической формы  
И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, М.М. Гончаров

# Классификация режимов (круглый нагреватель)



**Рис.9.** Диаграмма конвективных режимов в жидкости от круглого локализованного источника тепла

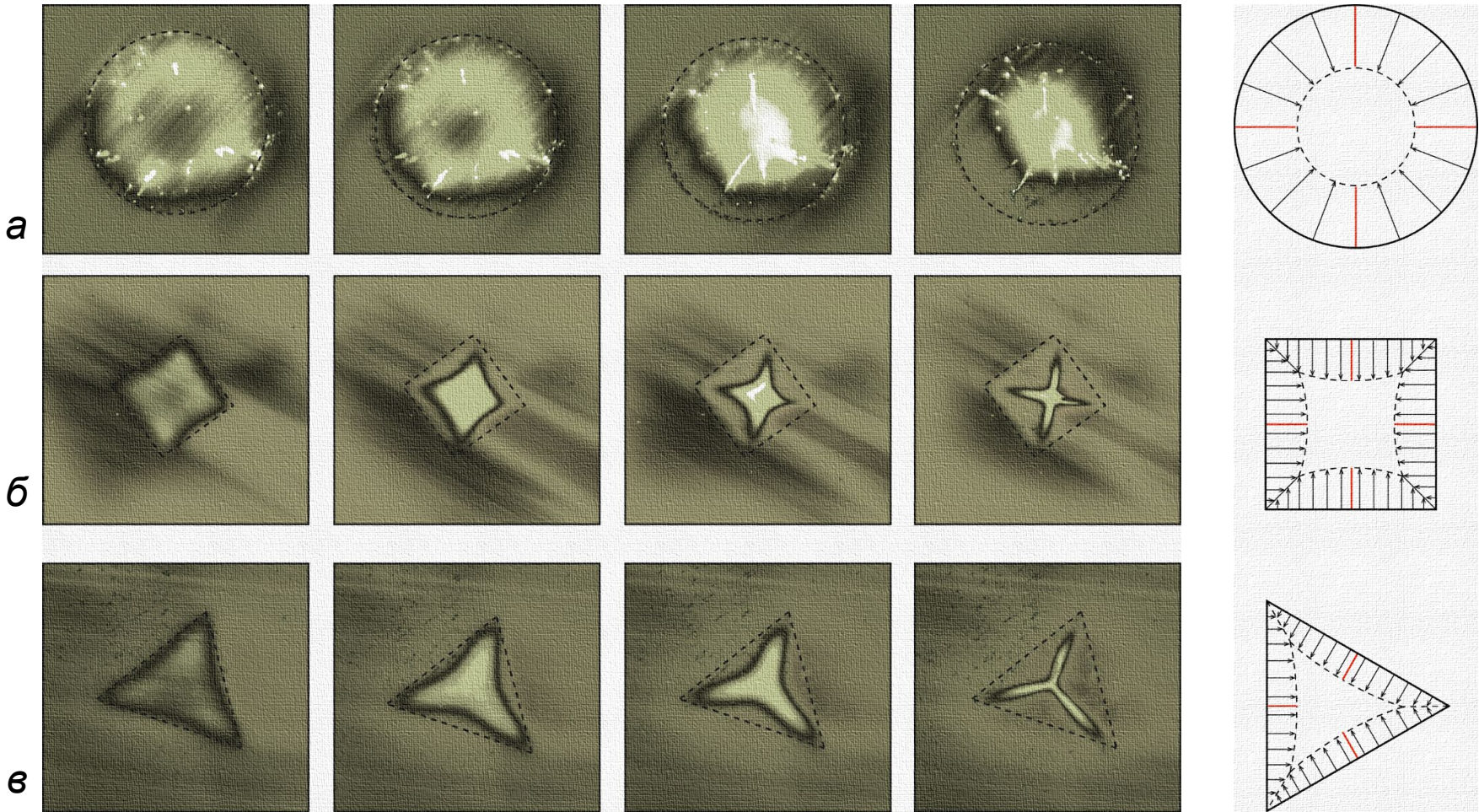
# Структура течения вблизи источников тепла различной геометрической формы (расчет)



**Рис.10.** Эволюция изотермической поверхности над нагревателями круглой (а), квадратной (б) и треугольной (в) формы



# Структура течения вблизи источников тепла различной геометрической формы (эксперимент)



**Рис.11.** Изменение поля концентрации со временем в плоскости  $y = 0.005$  м над поверхностью компактного источника различной геометрической формы: круглой (а), квадратной (б) и треугольной (в) формы.





## Заключение

В ходе настоящей работы было подробно исследовано развитие конвективного факела при локализованном подогреве в зависимости от условий подогрева.

При увеличении размера источника тепла возрастает разнообразие наблюдаемых в жидкости режимов конвекции.

Так, при малых значениях управляющего параметра в жидкости от локализованного нагревателя развивается одиночная конвективная струя, на начальном этапе формирования которой пограничный слой деформируется в центральной части подогреваемой области. С ростом числа Рэлея отмечалось изменение характера деформации пограничного слоя, при которой наиболее интенсивное течение происходит не в центре, а на периферии источника тепла.

Описанные результаты численного исследования подтверждаются экспериментальными наблюдениями.

**Благодарю за внимание**

