



Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
имени М.В.Ломоносова

# Влияние плёнки естественных примесей на теплообмен вблизи границы раздела «вода-воздух»

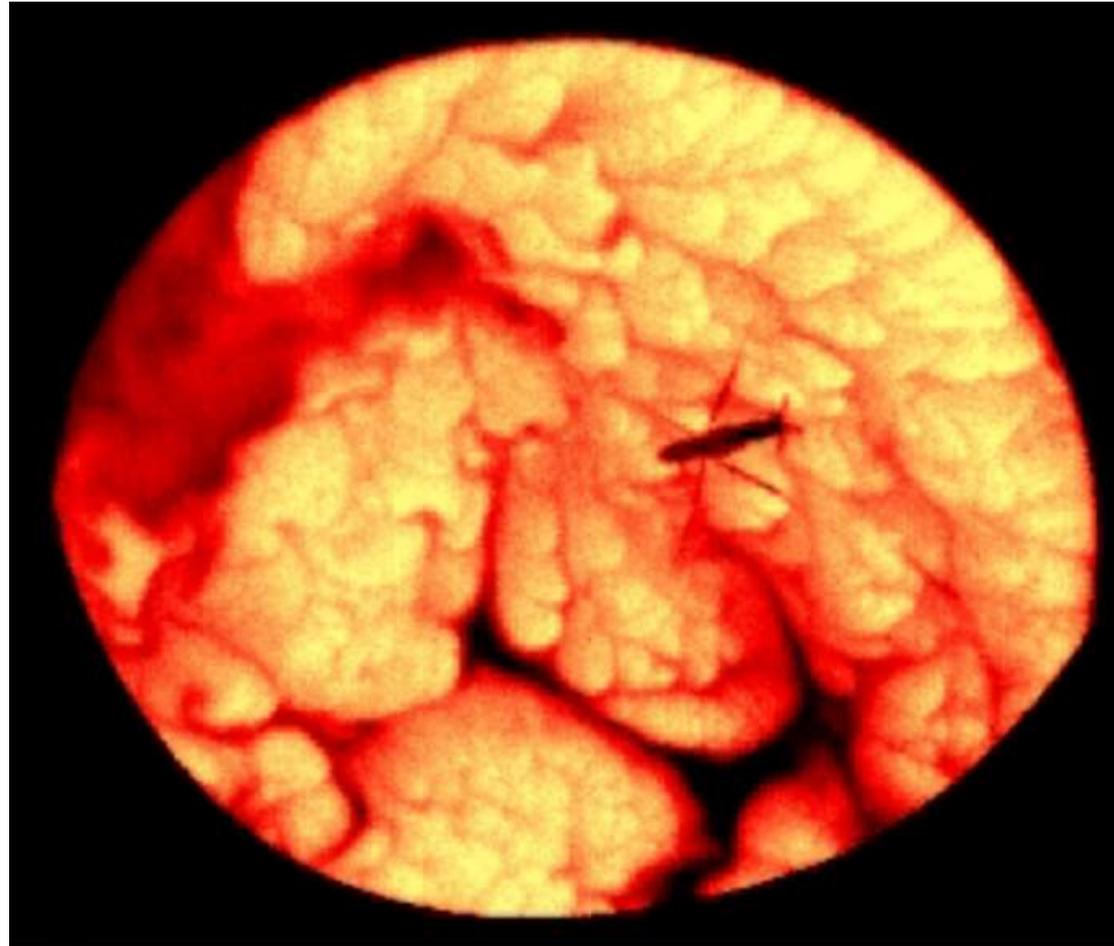
Плаксина Ю.Ю., Родыгин В.И., Пуштаев А.В., Руденко Ю.К.,  
Винниченко Н.А., Уваров А.В.



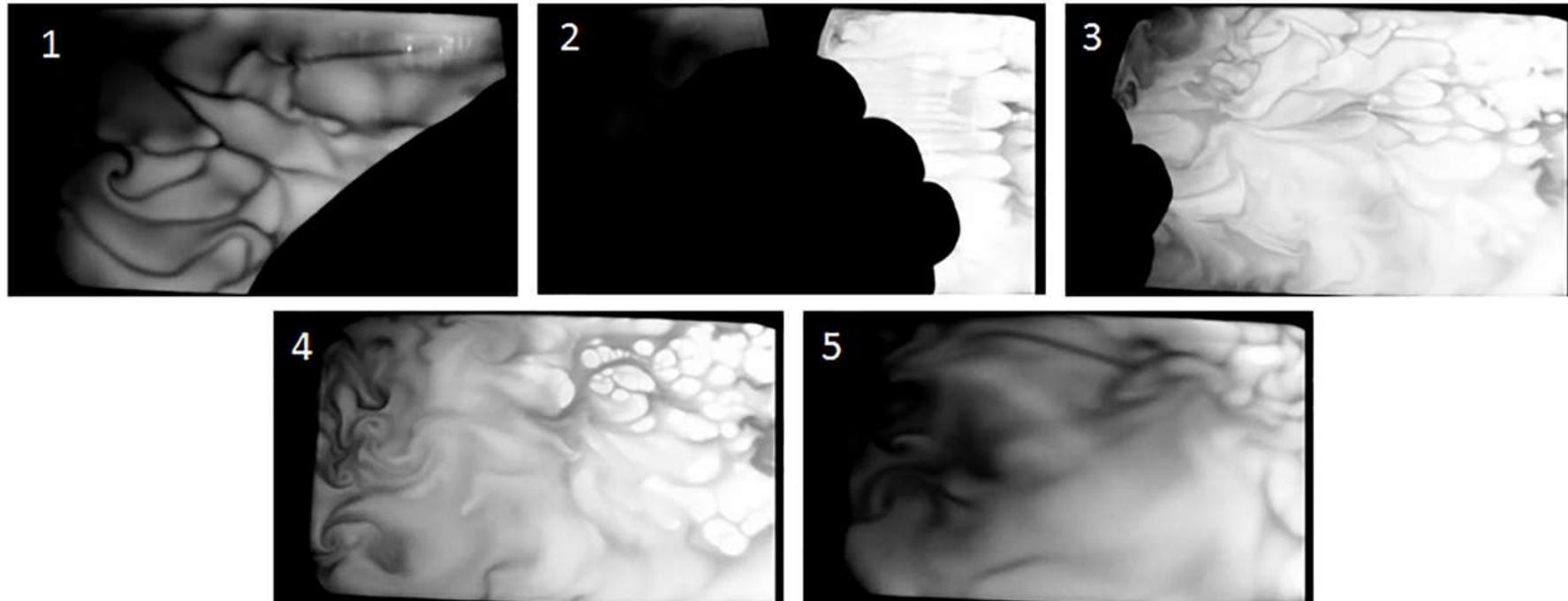
## ПЛЁНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ

Водомерка на  
поверхности  
деионизированной  
воды

При отсутствии  
естественных  
примесей  
водомерку сносит  
вместе с движением  
поверхности  
(температура воды  
30°C)



## ПЛЁНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ

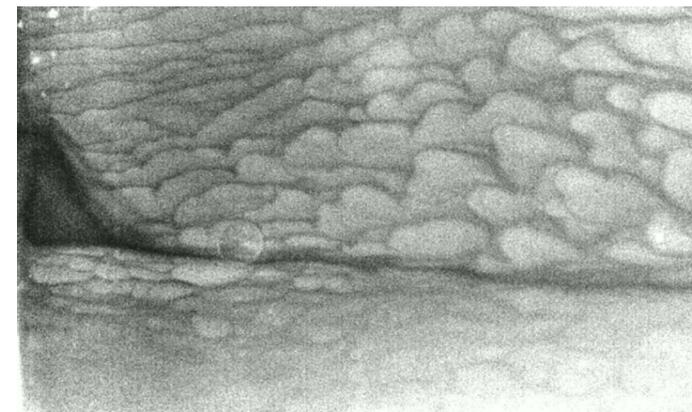
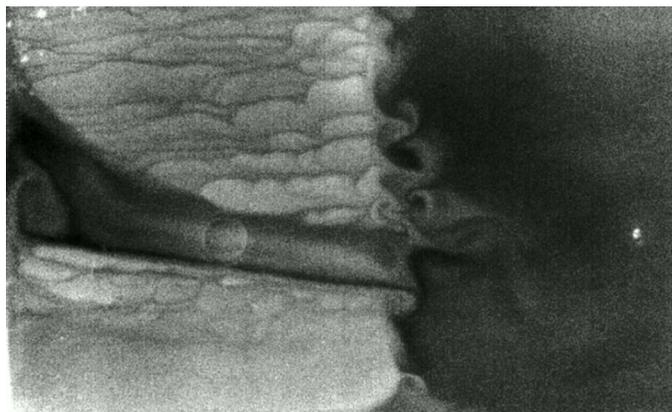


Смахивание (1-3) и восстановление (4-5) плёнки естественных примесей с поверхности воды.

ИК- снимки, (чем темнее цвет, тем ниже температура)

## ПЛЁНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ

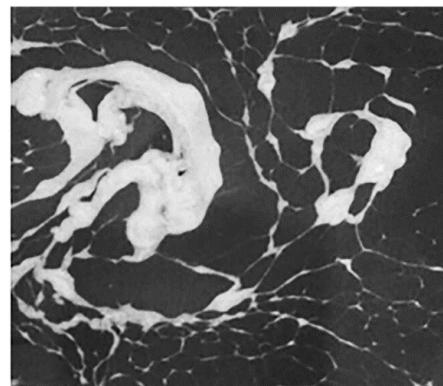
### Прорыв плёнки естественных примесей ветром (ИК – снимки)



Направление ветра

# СРАВНЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛЁНКОЙ И БЕЗ

ФОТОГРАФИИ  
ПОВЕРХНОСТИ

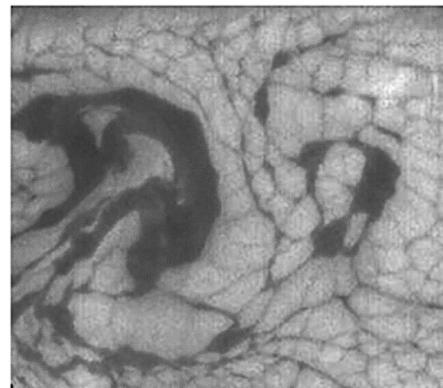
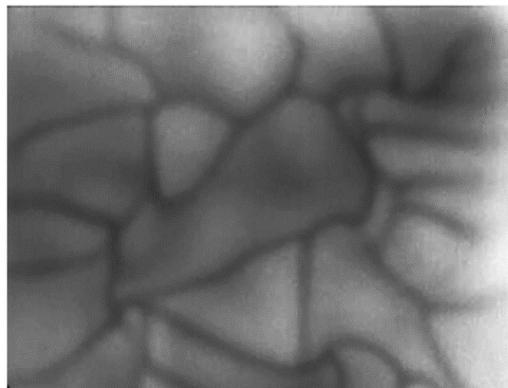


$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} \neq 0 \quad \frac{dv_z}{dz} \neq 0$$

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} = 0$$

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad \frac{dv_z}{dz} = 0$$

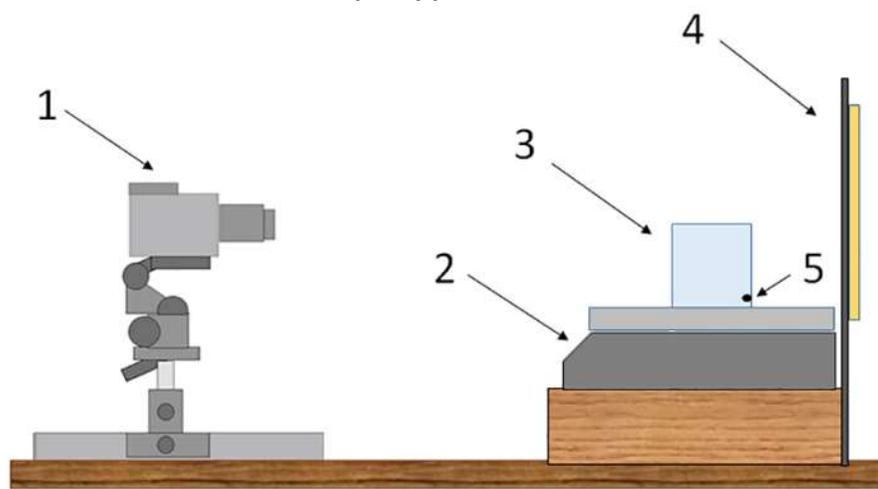
ИК-СНИМКИ С  
ТЕПЛОВИЗОРА



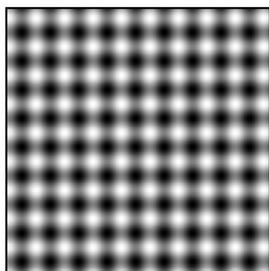
ВОДА

ЭТАНОЛ

## Определение потоков тепла и усреднённого поля температуры в воде

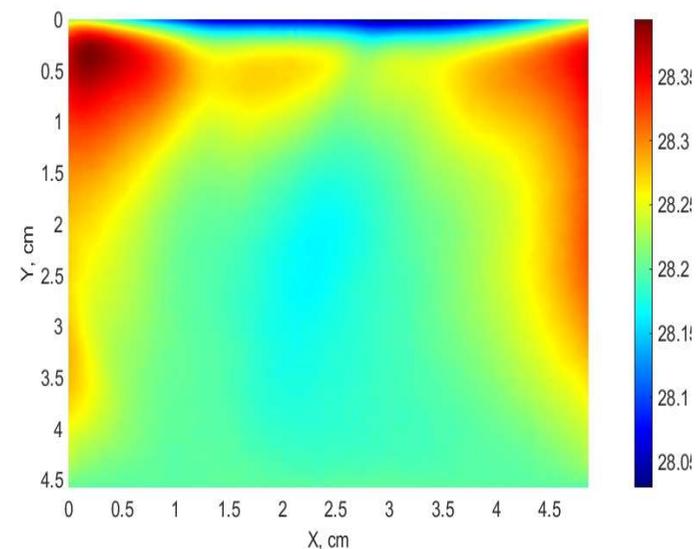


1 – камера, 2 – весы с непрерывной записью показаний, 3 – прозрачная ёмкость с жидкостью, 4 – фон на LED панели, 5 – термопара с непрерывной записью показаний

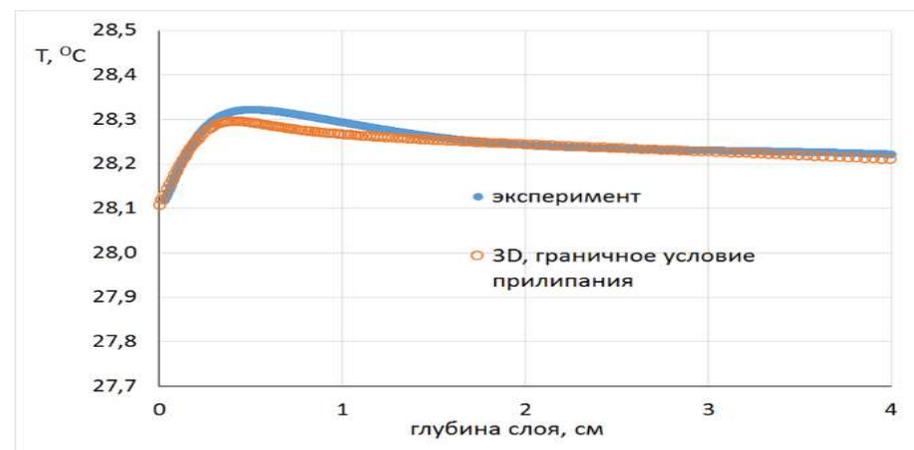


Фон FTP (Fourier Transform Profilometry)

Теневой фоновый метод

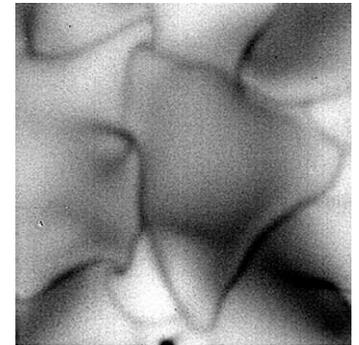
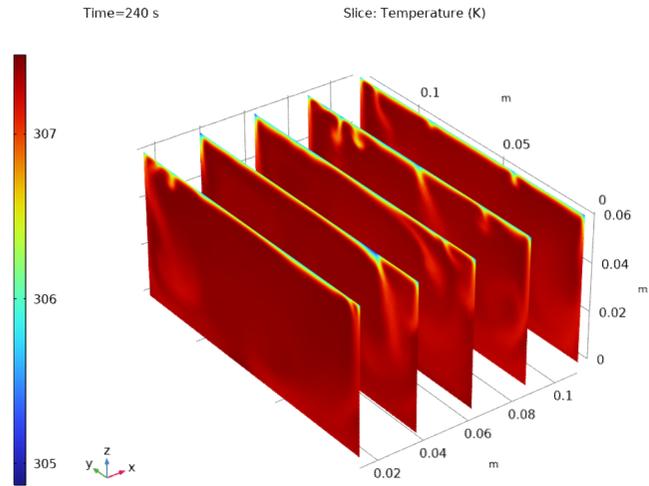
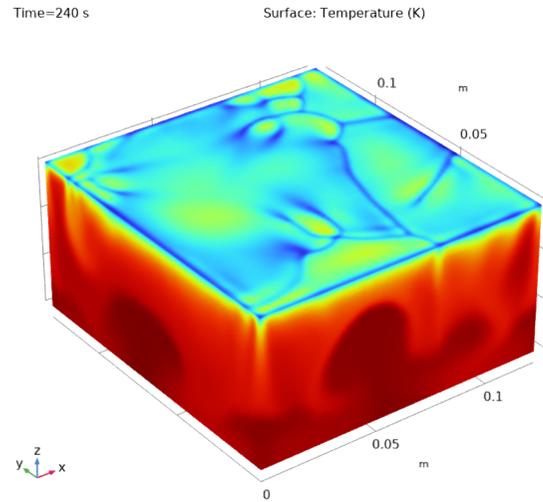


Пример усреднённого поля температуры в кювете

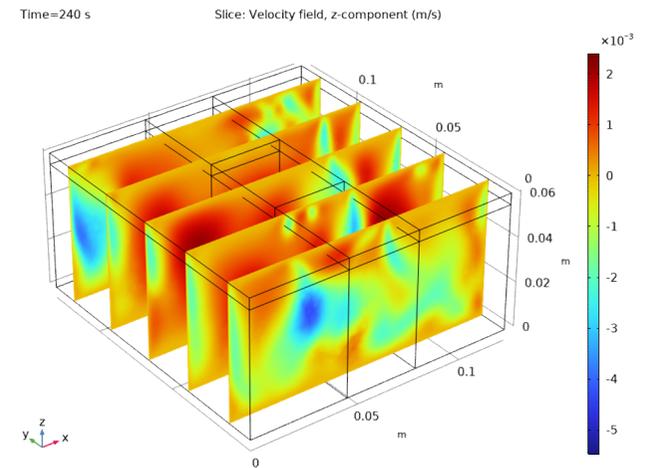
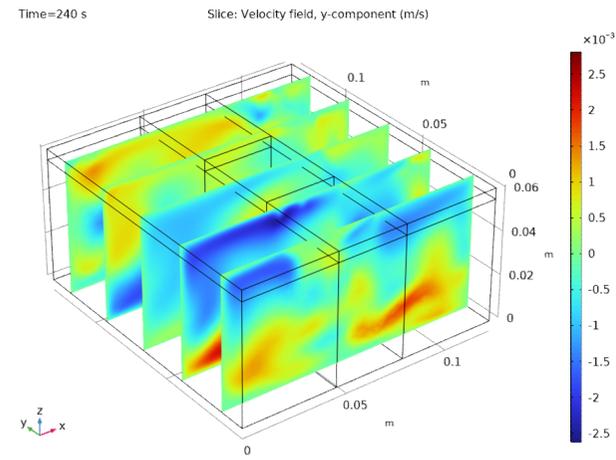
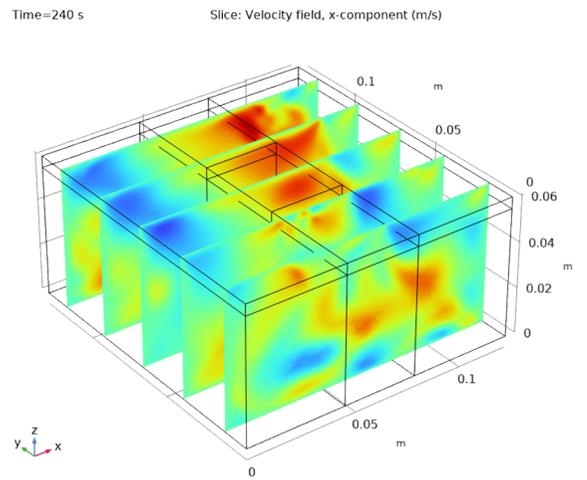


Средний вертикальный профиль температуры в кювете (эксперимент и 3D моделирование)

# Примеры результатов моделирования в Comsol остывания воды.

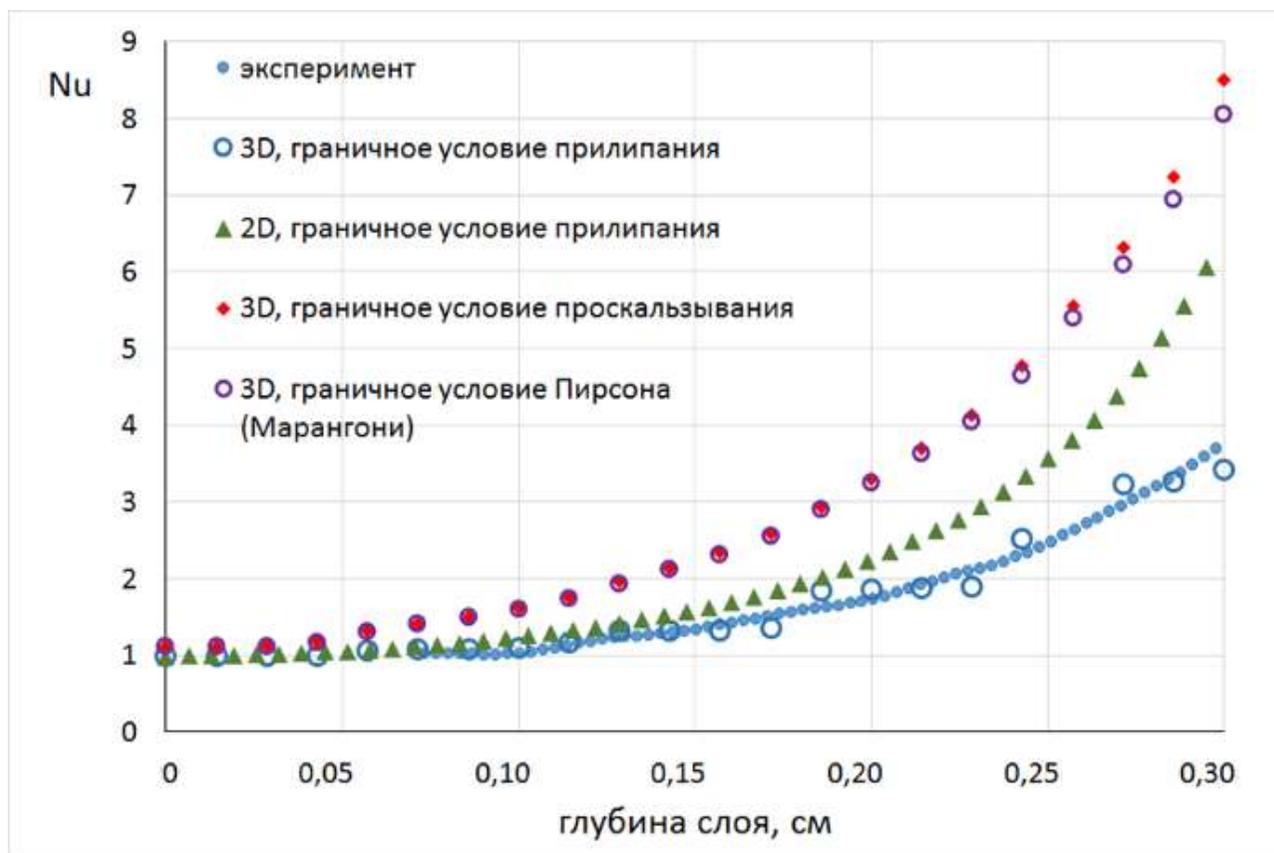


ИК-снимок  
поверхности воды



# Зависимость «локальных чисел Нуссельта» от глубины поверхностного слоя воды с разными граничными условиями

$$Nu = \frac{Q}{-\lambda \frac{dT}{dz}}$$



ВОДА,  $Q=49,8$  Вт/м<sup>2</sup>

«Локальный Нуссельт» позволяет получить всю информацию о тепловом потоке. Но традиционно используется более простой подход, основанный на точечных измерениях температуры

$$Nu = \frac{QL}{-\lambda\Delta T} \quad Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\chi} \quad Nu = ARa^{1/3}$$

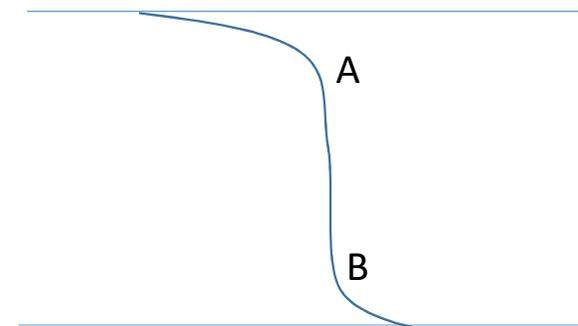
Традиционная зависимость  
для геофизики и теплофизики

$A = A(Ra)$  – слабая зависимость

В реальности ее смысл прост – от  $L$  ничего не зависит и разность температур фиксирована

$$\Delta T^{4/3} = \frac{Q}{\lambda A (g\beta)^{1/3}} (\nu\chi)^{1/3} \approx const \quad A = \frac{Q}{\lambda\Delta T^{4/3}} \left( \frac{\nu\chi}{g\beta} \right)^{1/3}$$

Смысл прост – формула работает от точки А до точки В на рисунке при условии, что градиент температуры на отрезке А-В очень мала разность температур – между точкой А и поверхностью. Если рассматривается и вторая разность температур у дна – величина А меняется



## ВЫВОДЫ

При наличии пленки естественных примесей наблюдается равенство нулю поверхностной дивергенции скорости. Это приводит к условию  $dv_z/dz=0$  и появлению холодной пленки. При отсутствии движения поверхности воды, моделирование с граничным условием прилипания даёт наиболее точное описание теплообмена воды с воздухом.

В присутствии плёнки естественных примесей использование условия проскальзывания на поверхности, а тем более условие Пирсона приводит к неверным расчётам.

Ситуации с наличием или отсутствием плёнки естественных примесей сильно отличаются по структуре приповерхностных вихрей и условиям переноса тепла вблизи поверхности (зависимости  $Nu(Ra)$ ).