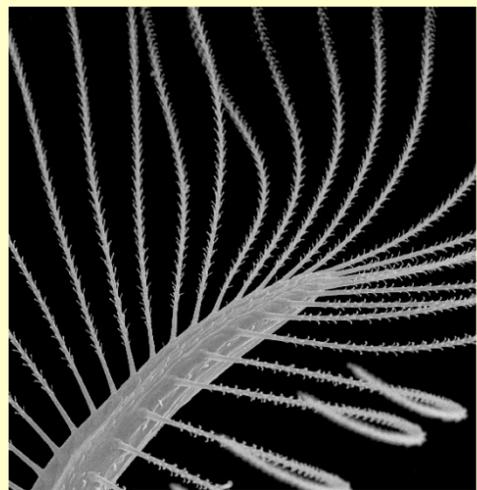


# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ ПОЛЁТА МЕЛЬЧАЙШИХ НАСЕКОМЫХ С ПОМОЩЬЮ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА ЛОМОНОСОВ-2

С. Фарисенков<sup>1</sup>, Д. Коломенский<sup>2</sup>, П. Петров<sup>1</sup>,  
Н. Лапина<sup>1</sup>, Ф.-О. Леманн<sup>3</sup>, Р. Ониши<sup>4</sup>, Х. Лю<sup>5</sup>,  
А. Полилов<sup>1</sup>



<sup>1</sup>МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Сколтех

<sup>3</sup>Ростокский Университет, Германия

<sup>4</sup>Токийский технологический Институт, Япония

<sup>5</sup>Университет Тибы, Япония

# Соавторы

Кафедра Энтомологии,  
Московский Государственный  
Университет



Алексей  
Полилов



Сергей  
Фарисенко  
в



Пётр  
Петров



Надежда  
Лапина

Лаборатория Проф. Рё Ониши, Токийский  
Технологический Университет, Япония



## AIFIT

*Aerodynamics of Insect Flight In Turbulent Flow*

<http://aifit.cfd.tu-berlin.de>



Thomas  
Engels  
(TU Berlin)



Marie  
Farge  
(ENS  
Paris)



Jörn  
Sesterhenn  
(TU Berlin)



Fritz-Olaf  
Lehmann  
(Rostock)



Henja  
Wehmann  
(Rostock)



Kai  
Schneider  
(Aix-  
Marseille)

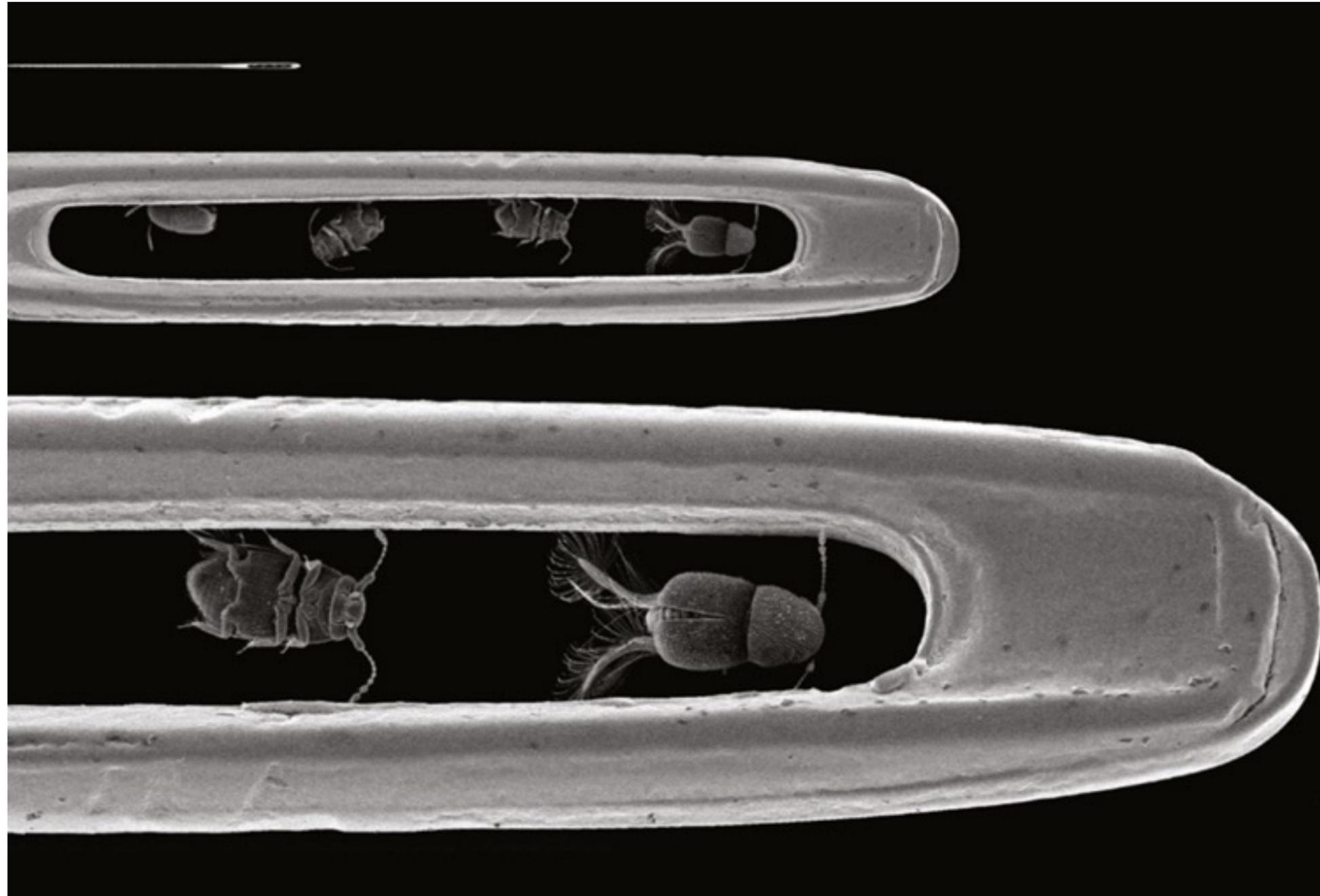


Hung  
Truong  
(Aix-  
Marseille)

Лаборатория Проф. Хао Лю,  
Университет Тибы, Япония



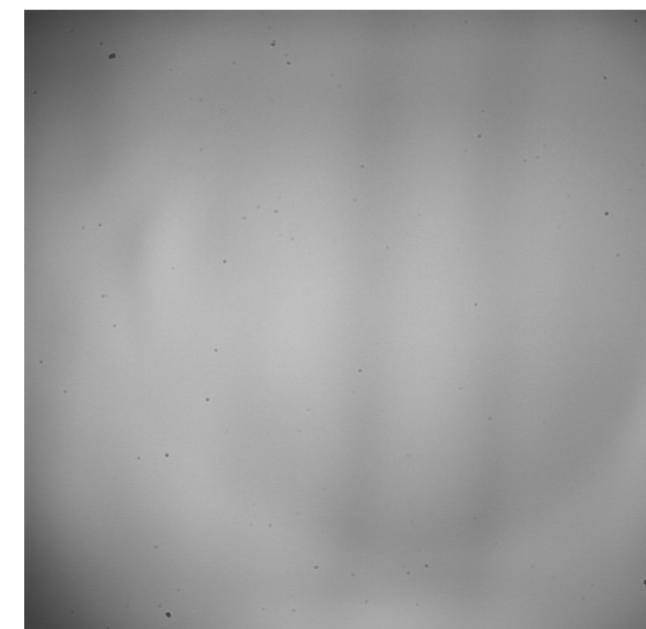
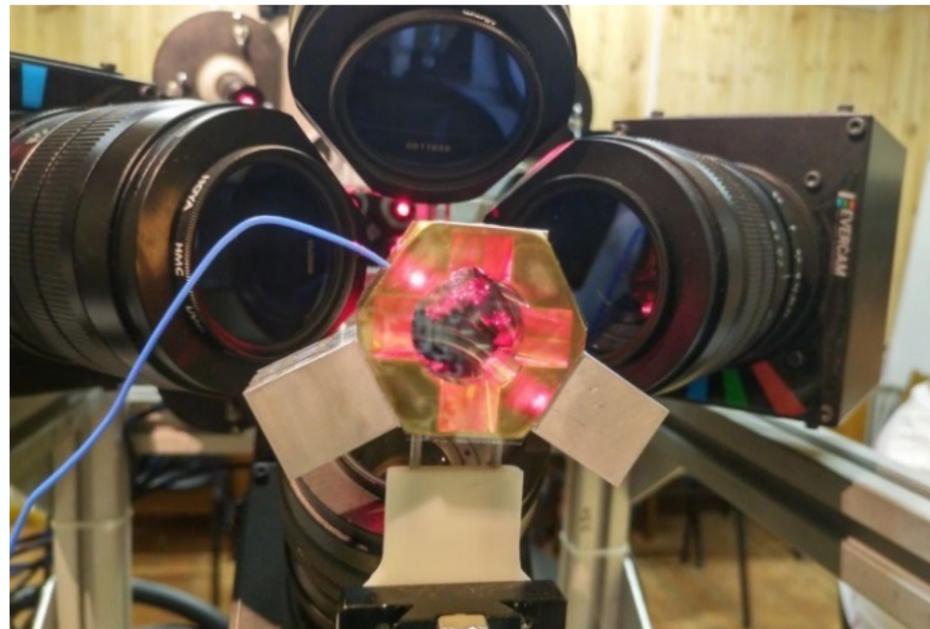
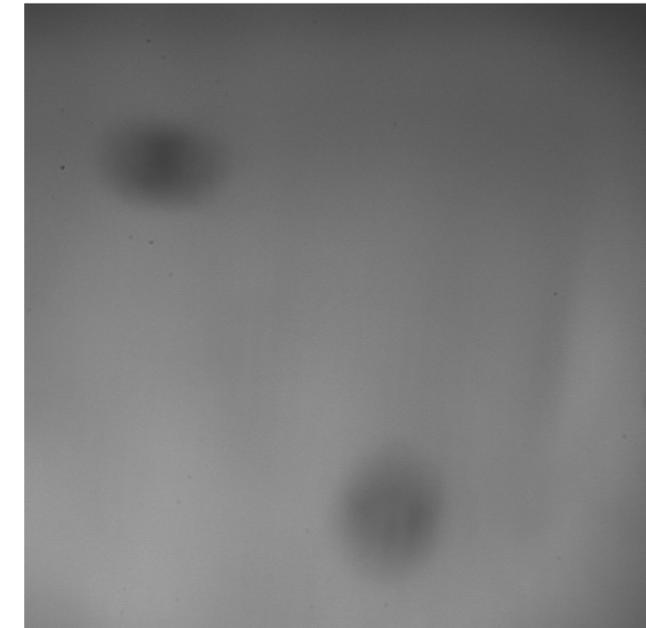
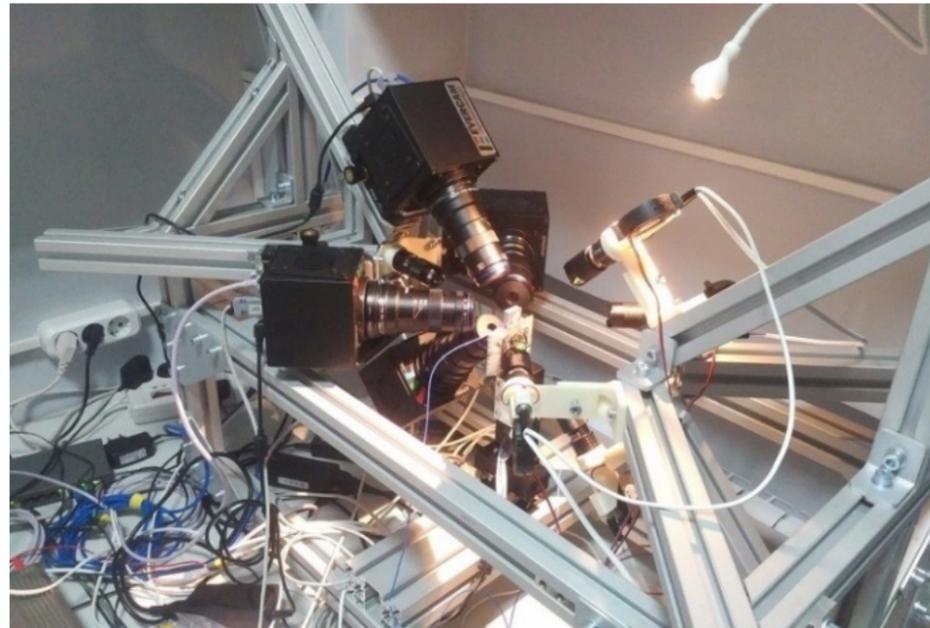
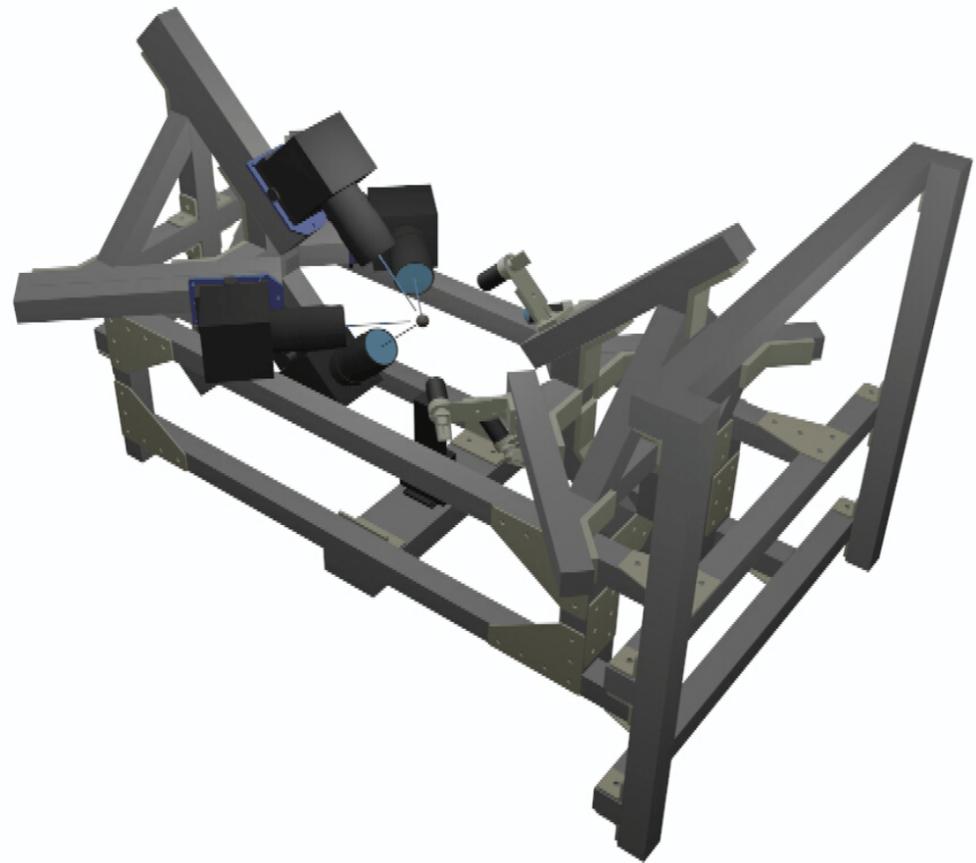
# Мельчайшие перокрытые жуки



Фарисенков, Полилов (2022)

# Скоростная макровидеосъемка

Скоростные камеры. Проходящий ИК свет. 5000 кадров в секунду



Фарисенков, Полилов (2022)

# Сравнение скорости полёты мельчайших жуков



*Dinaraea*  
(Staphylinidae)

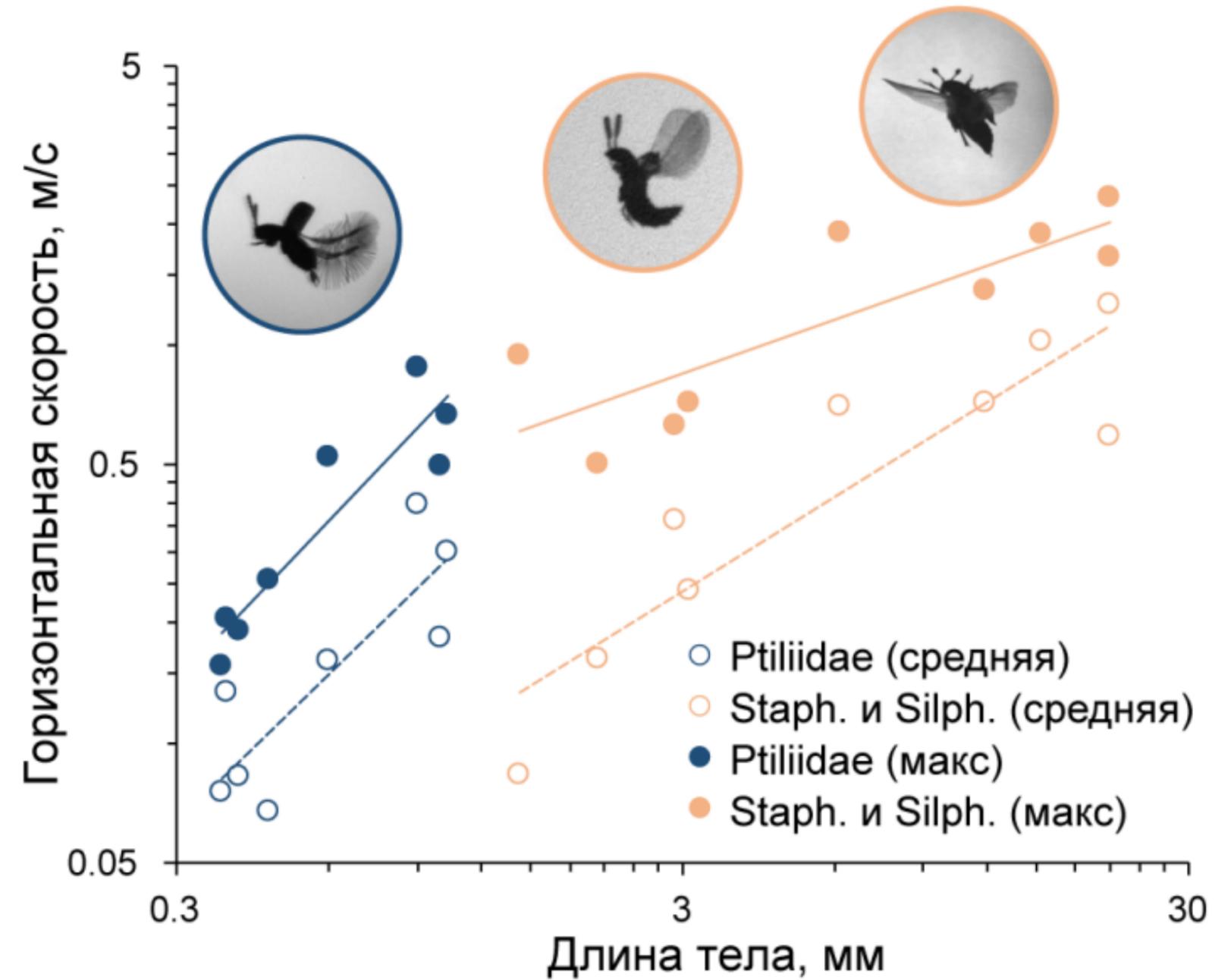


*Acrotrichis*  
(Ptiliidae)

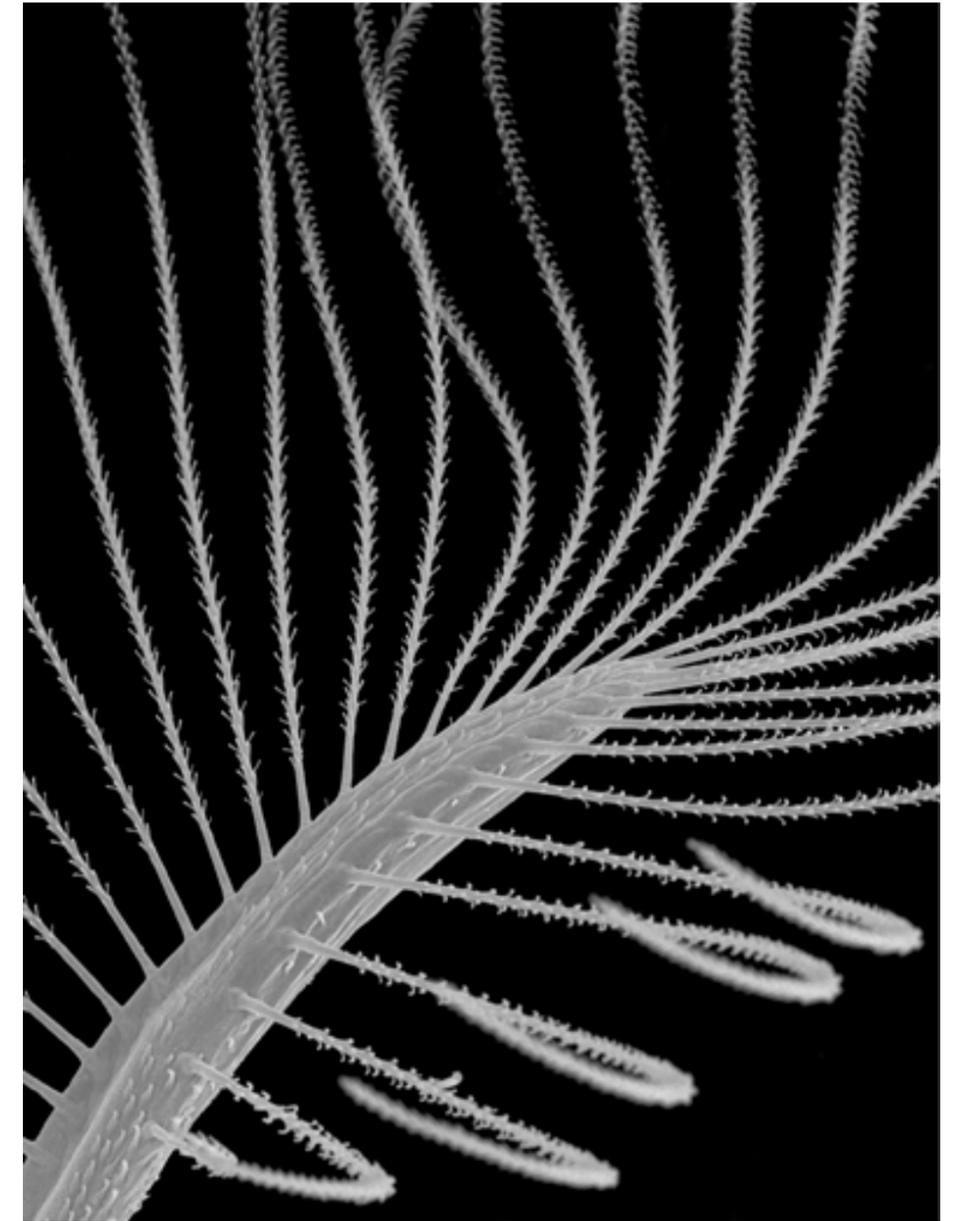
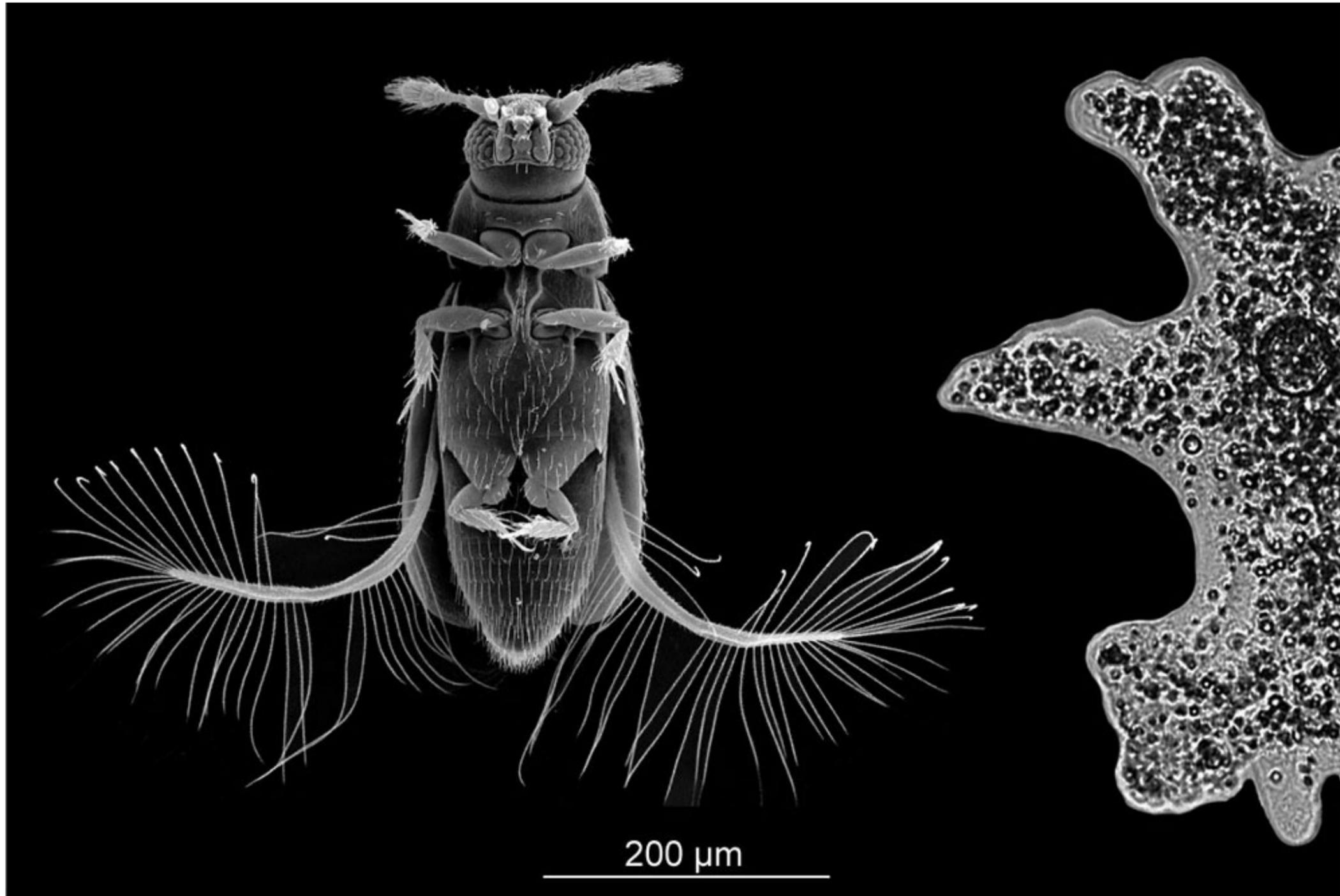


1 mm

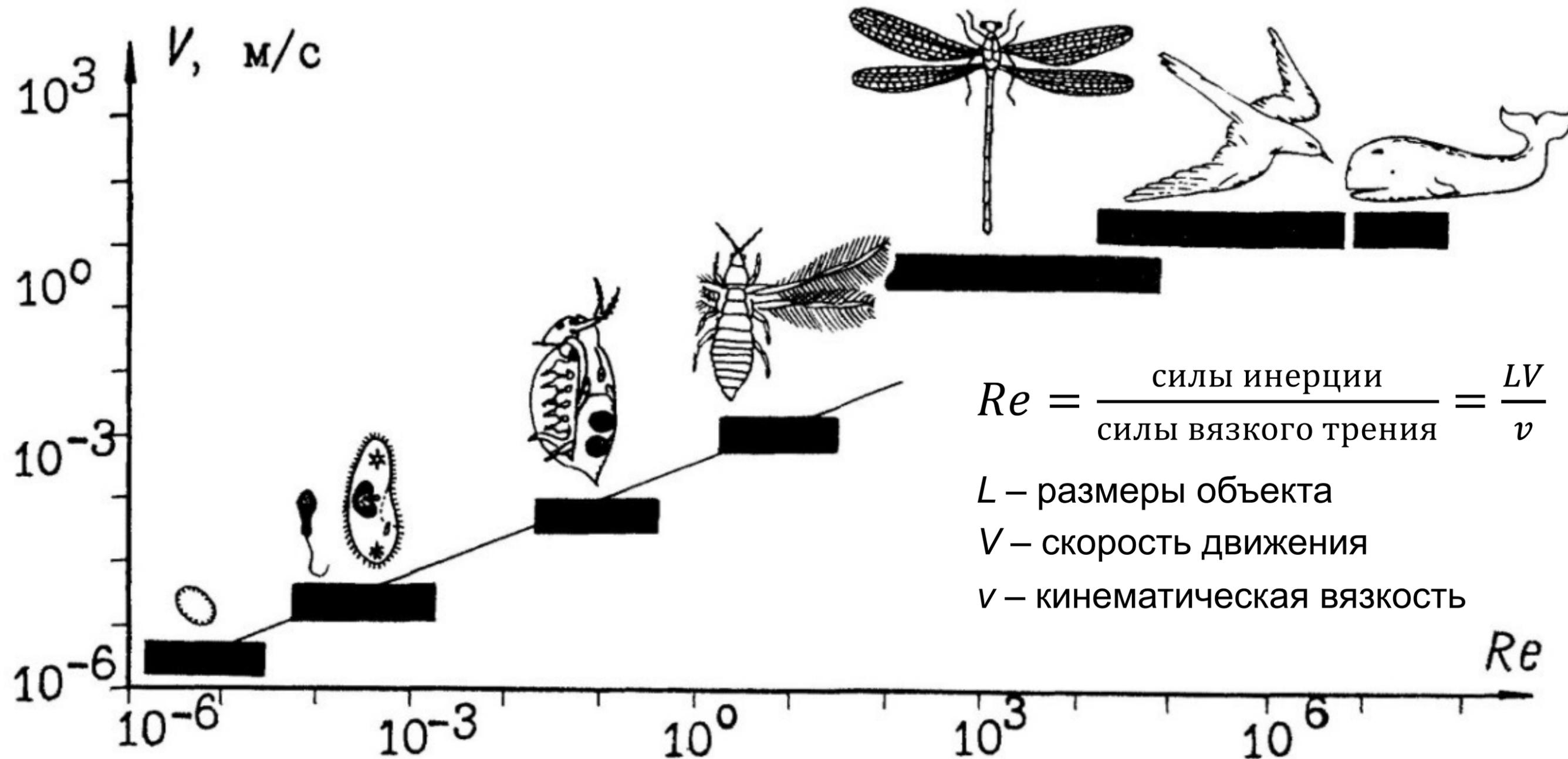
Udo Schmidt



# *Птилоптеригия: перокрытость*

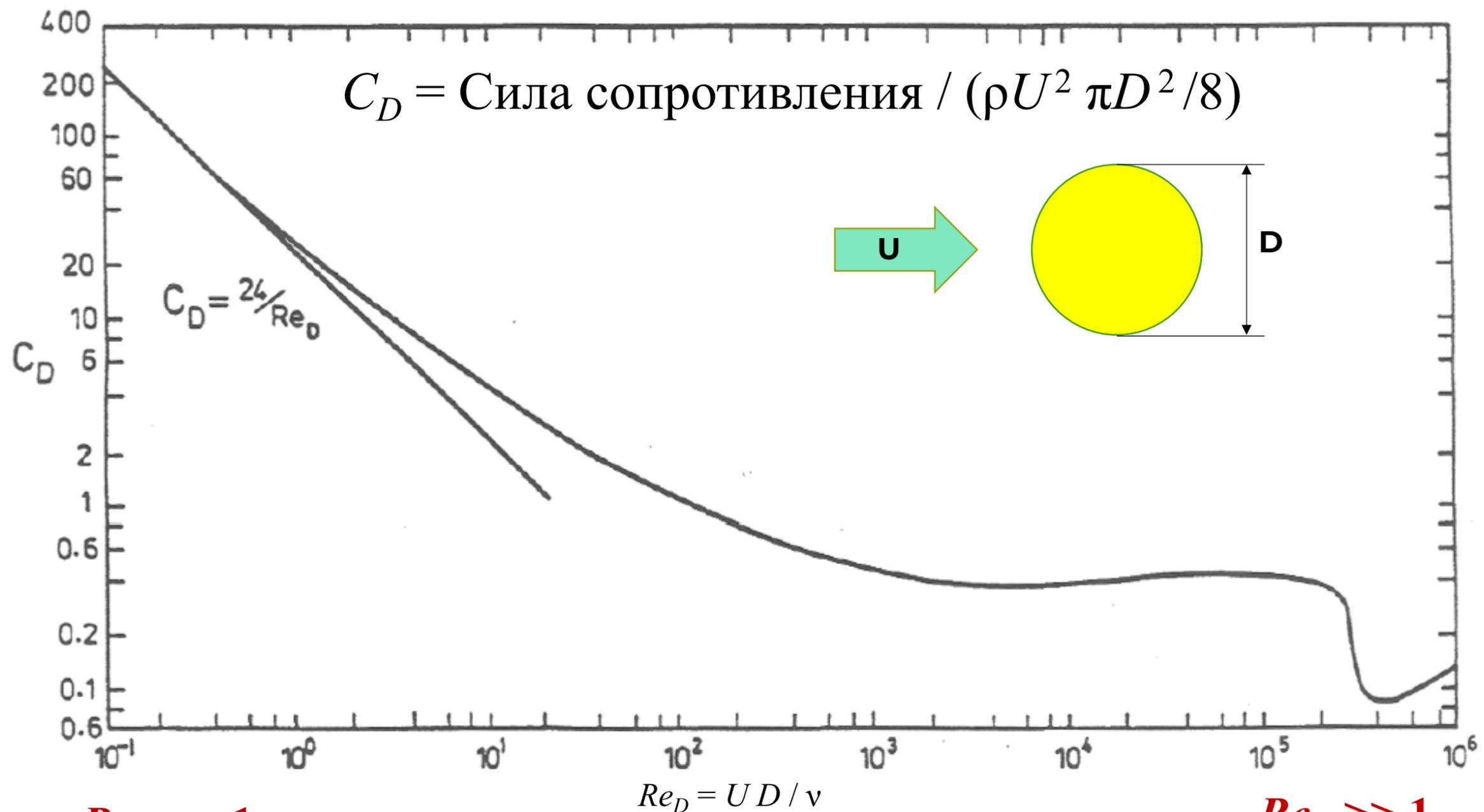


# Связь числа Рейнольдса и скорости движения



Бродский 1989

# Коэффициент аэродинамической силы



$Re_D \ll 1$

Сила  $\sim U$

$C_D \sim Re^{-1}$

$Re_D \gg 1$

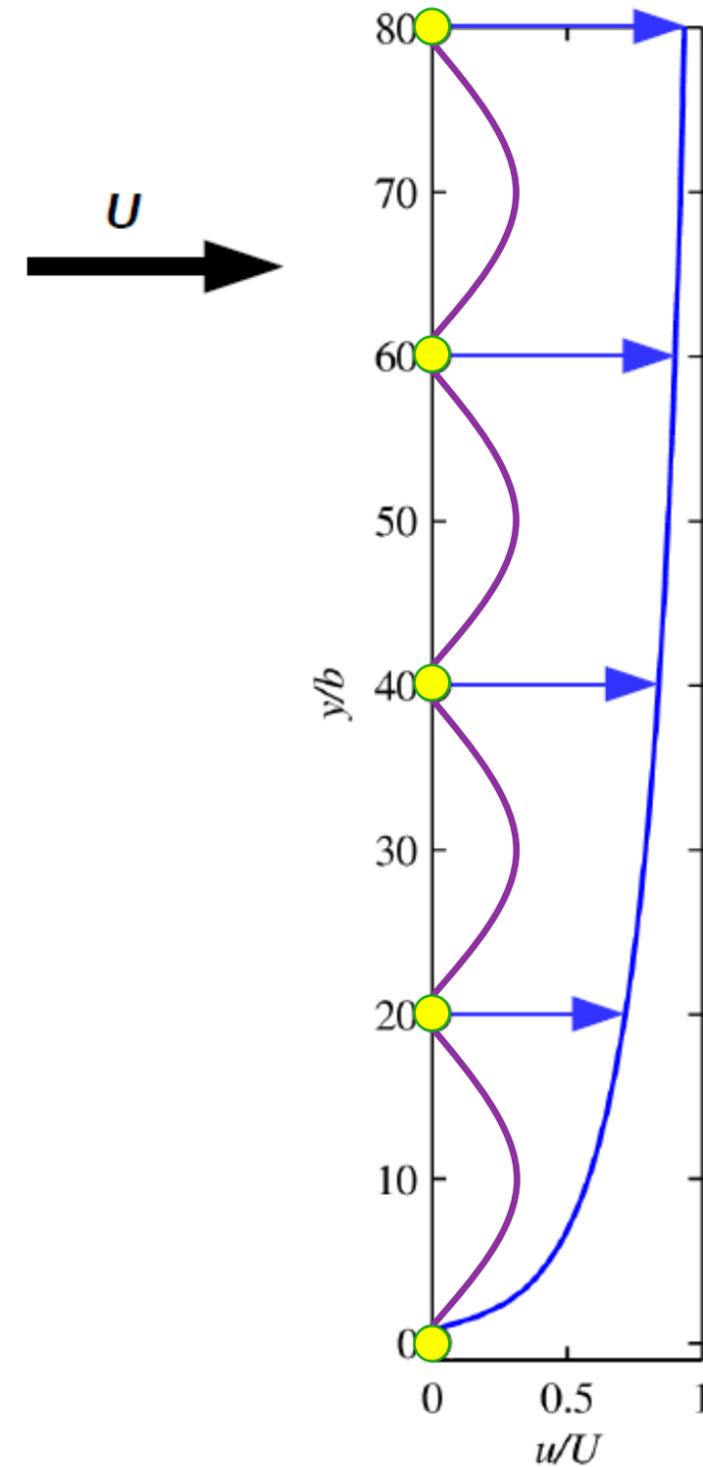
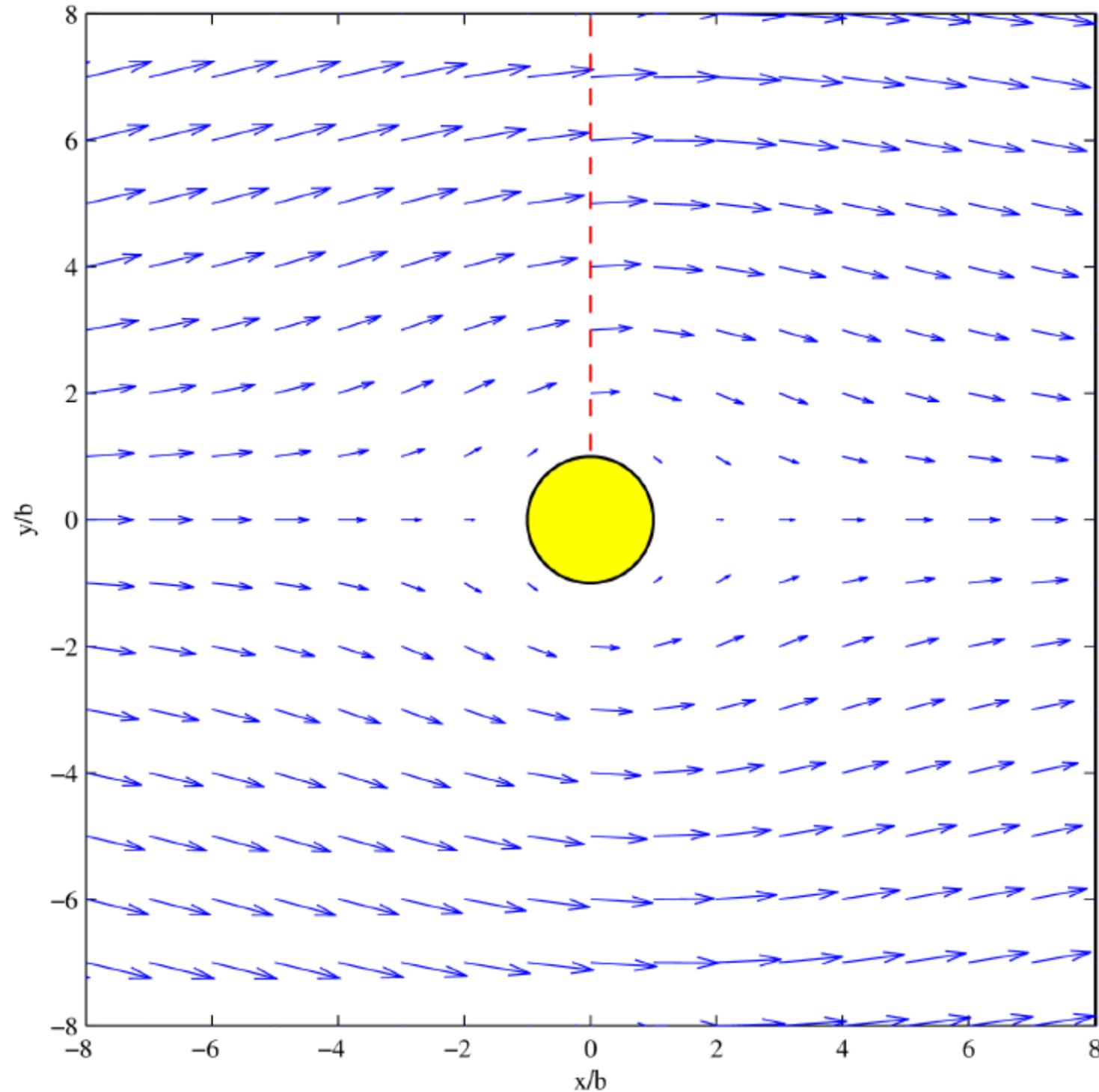
Сила  $\sim U^2$

$C_D \sim const$

# Обтекание воздухом решётки цилиндров

Число Рейнольдса  $Re_b = \frac{Ub}{\nu} = 0.03$

NB:  $b$  - радиус цилиндра в данном расчёте



# Профили скорости при различных значениях $Re$

$Re$  по радиусу

$$Re_b = \frac{Ub}{\nu} = 0.03$$

$$Re_b = 0.003$$

$$Re_b = 0.0003$$

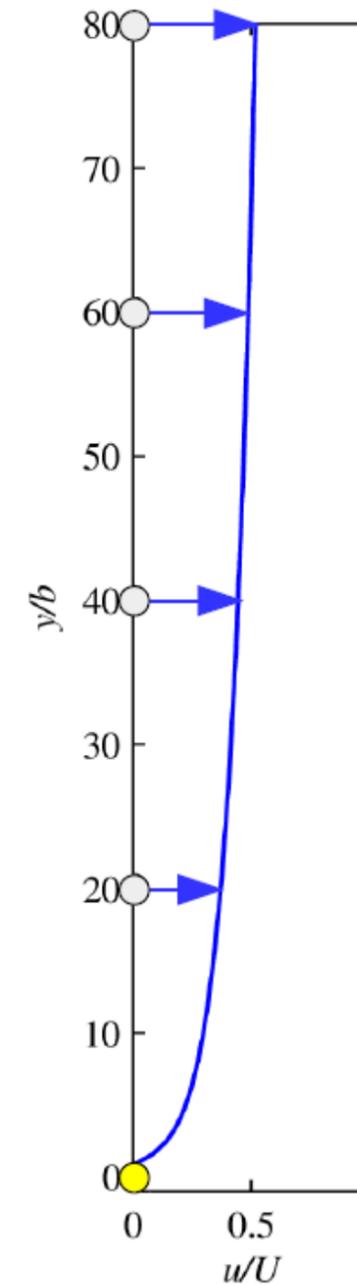
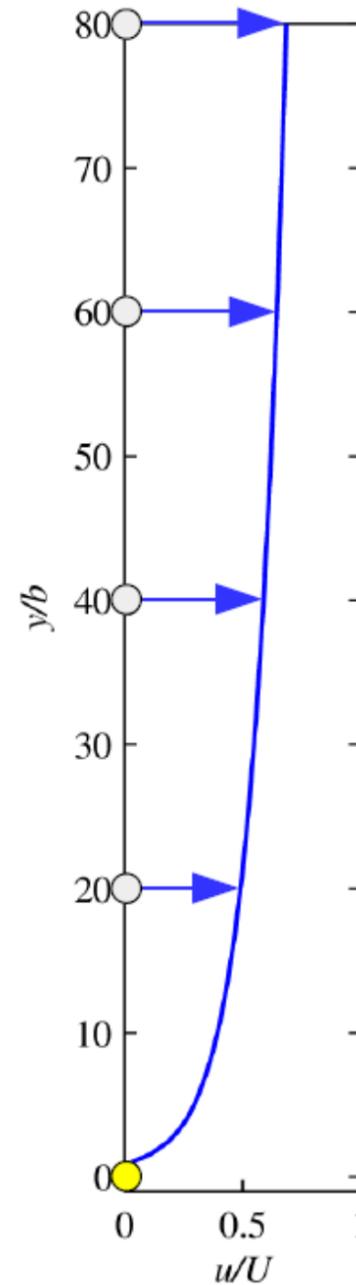
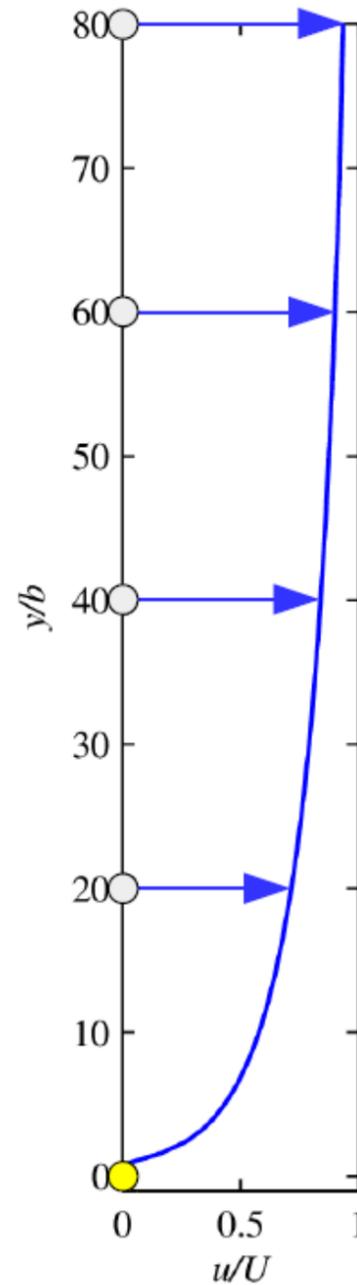
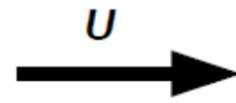
$Re$  по длине

$$Re_c = \frac{Uc}{\nu} = 12$$

$$Re_c = 1.2$$

$$Re_b = 0.12$$

... течение Стокса



# Морфометрия перистого крыла



# ПО для численного моделирования полёта насекомых

Решатель WABBIT разработан в рамках проекта **AIFIT**  
<https://github.com/adaptive-cfd/WABBIT>

- Метод искусственной сжимаемости
- Метод штрафных функций для условия прилипания
- Блочнo-структурированная сетка
- Динамическая адаптация по решению с оценкой погрешности
- MPI параллелизм

T. Engels, K. Schneider, J. Reiss and M. Farge,  
A Wavelet-Adaptive Method for Multiscale Simulation of Turbulent Flows in Flying Insects  
Commun. Comput. Phys., 30 (2021), pp. 1118-1149.  
<https://doi.org/10.4208/cicp.OA-2020-0246>

# Метод штрафных функций для ГУ прилипания

Модифицированные уравнения Навье-Стокса:

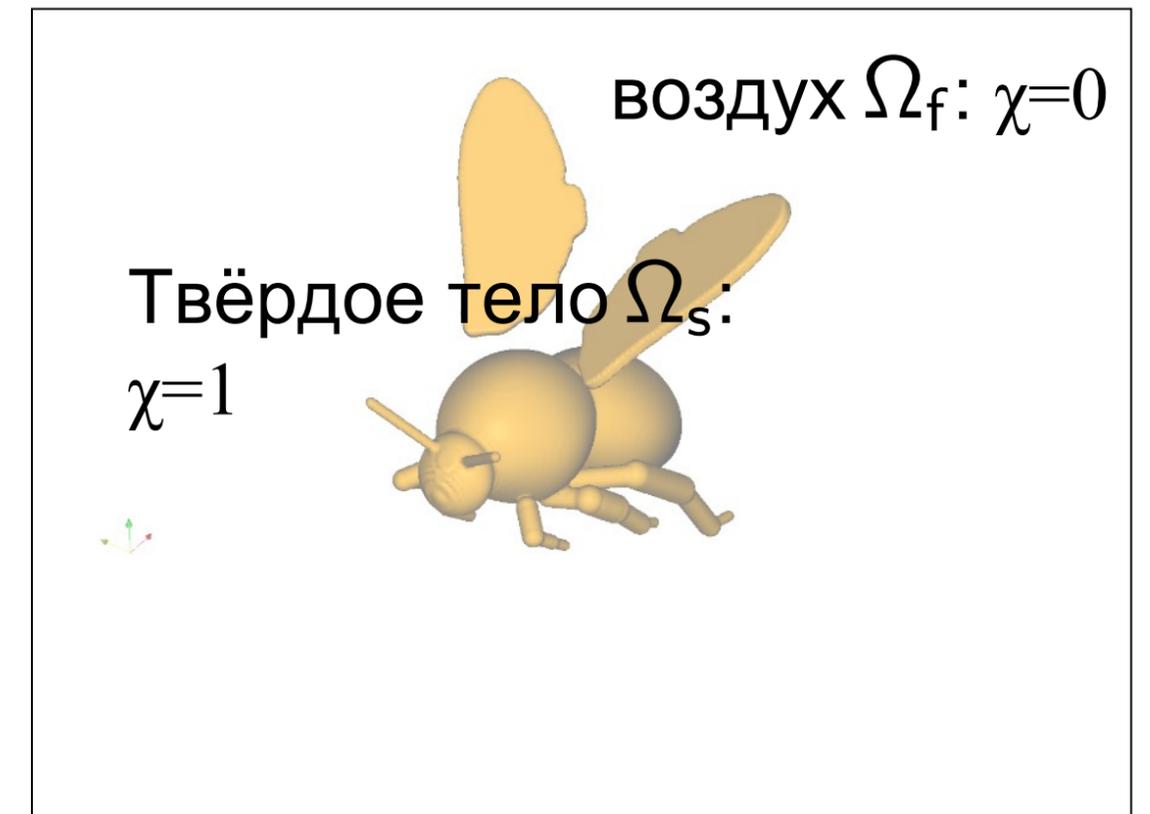
$$\partial_t \underline{u} + \underline{\omega} \times \underline{u} = -\nabla \Pi + \nu \nabla^2 \underline{u} + \underline{F}_p - \frac{\chi}{C_\eta} (\underline{u} - \underline{u}_s)$$

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0$$

$$\underline{u}(\underline{x}, t = 0) = \underline{u}_0(\underline{x})$$

- Вязкая несжимаемая жидкость
- Недеформируемое твёрдое тело
- Граничные условия прилипания выполняются приблизительно

$$\chi(\underline{x}, t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \underline{x} \in \Omega_f \\ 1 & \text{if } \underline{x} \in \Omega_s \end{cases}$$



DK and K. Schneider

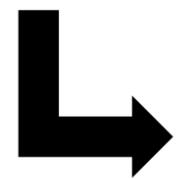
A Fourier spectral method for the Navier–Stokes equations with volume penalization for moving solid obstacles

*J. Comput. Phys.* **228**:5687-5709 (2009)

# Влияние штрафного параметра

- $C_\eta$  можно интерпретировать как характеристику проницаемости
- $C_\eta$  является временем релаксации
- $C_\eta$  должно быть малым

$$\partial_t \underline{u} = -\frac{\chi}{C_\eta} (\underline{u} - \underline{u}_s)$$



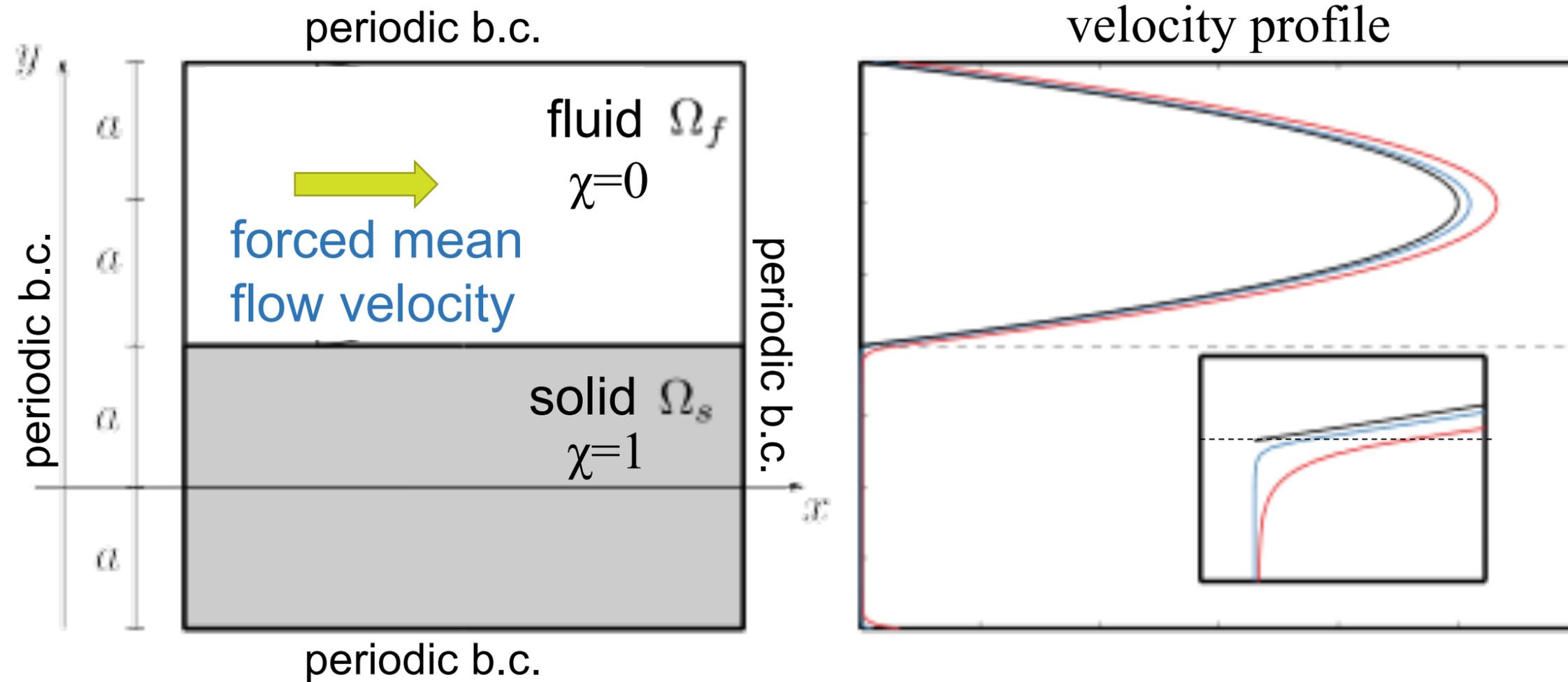
$$\underline{u} = \underline{u}_0 \quad \text{if } \underline{x} \in \Omega_f$$

$$\underline{u} = \underline{u}_s + (\underline{u}_0 - \underline{u}_s)e^{-t/C_\eta} \quad \text{if } \underline{x} \in \Omega_s$$

- Жёсткость оператора:  $dt < C_\eta$  при явном интегрировании по времени
- Внутренний пограничный слой в твёрдом теле

# Плоское течение Пуазейля

- Внутренний пограничный слой в твёрдом теле



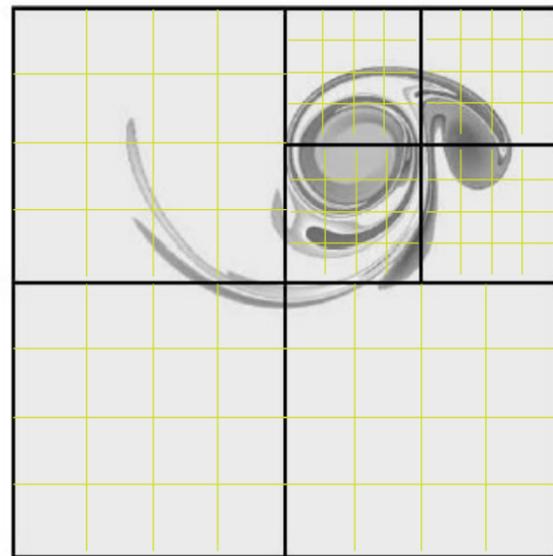
# Метод искусственной сжимаемости

Вместо уравнения Пуассона решается уравнение переноса поля давления. При достаточно малом  $C_0$  решение системы уравнений с искусственной сжимаемостью сходится к решению несжимаемых уравнений Навье-Стокса.

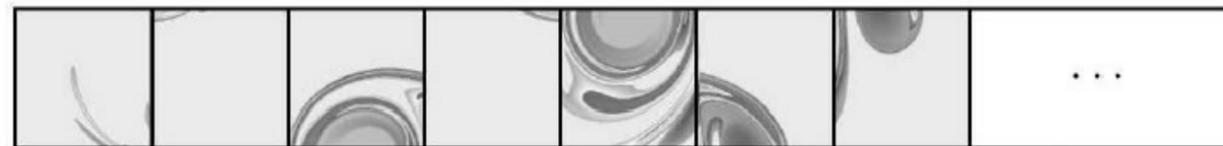
$$\partial_t \underline{u} + \underline{u} \cdot \nabla \underline{u} + \nabla p - \nu \nabla^2 \underline{u} + \frac{\chi}{C_\eta} (\underline{u} - \underline{u}_s) + \frac{\chi_{sp}}{C_{sp}} (\underline{u} - \underline{u}_\infty) = 0$$
$$\partial_t p + C_0^2 \nabla \cdot \underline{u} + C_\gamma p + \frac{\chi_{sp}}{C_{sp}} (p - p_\infty) = 0$$

# Динамическая адаптация сетки

grid layout

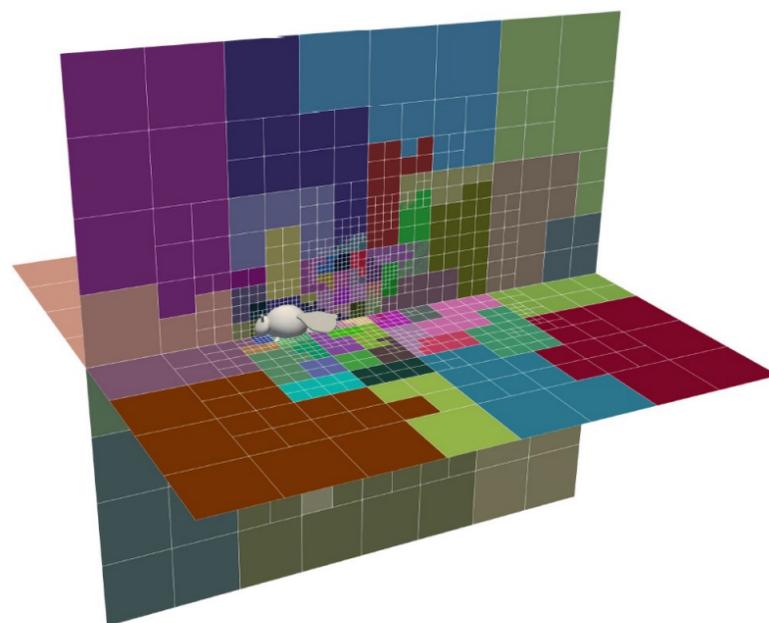


memory layout



allocated, but unused storage

Parallel load balancing using space-filling curve



Для оценки погрешности и динамической адаптации сетки используются биортогональные вейвлеты

$$v(x) = \sum_{i \in \mathbb{Z}} \langle v, \tilde{\phi}_i^0(x) \rangle \phi_i^0(x) + \sum_{J=0}^{\infty} \sum_{i \in \mathbb{Z}} \langle v, \tilde{\psi}_i^J(x) \rangle \psi_i^J(x)$$

# Схемы Рунге-Кутты-Чебышёва

- При малом числе Рейнольдса возникает проблема: действительная часть собственных значений возрастает пропорционально квадрату шага сетки

- Это приводит к ~~непрактичному~~  $Re(\lambda) = \frac{16}{\nu} \Delta x^2$  ограничению шага по времени:

- Константа  $b$   $\Delta t < b/Re(\lambda) = b\Delta x^2/\nu$  зависит от схемы интегрирования по времени. Классическая схема Рунге-Кутты 4 порядка имеет  $b \approx 2.7$ .

- Схемы Рунге-Кутты-Чебышёва могут иметь  $b \gg 1$ .

[1] B. P. Sommeijer, L. F. Shampine, and J. G. Verwer. RKC: An explicit solver for parabolic PDEs. J Comput. Appl. Math, 88:315–326, 1997.

[2] J. G. Verwer, W. H. Hundsdorfer, and B P Sommeijer. Convergence properties of the runge-kutta-chebyshev method. Numer. Math., 57:157–178, 1989.

[3] JG Verwer, B P Sommeijer, and W Hundsdorfer. RKCtime-stepping for advection–diffusion–reaction problems. J Comput. Phys., 201:61–79, 2004.

# Схемы Рунге-Кутты-Чебышёва

Область устойчивости схема Рунге-Кутты 4 порядка

Собственные значения оператора  
одномерной задачи с параметрами

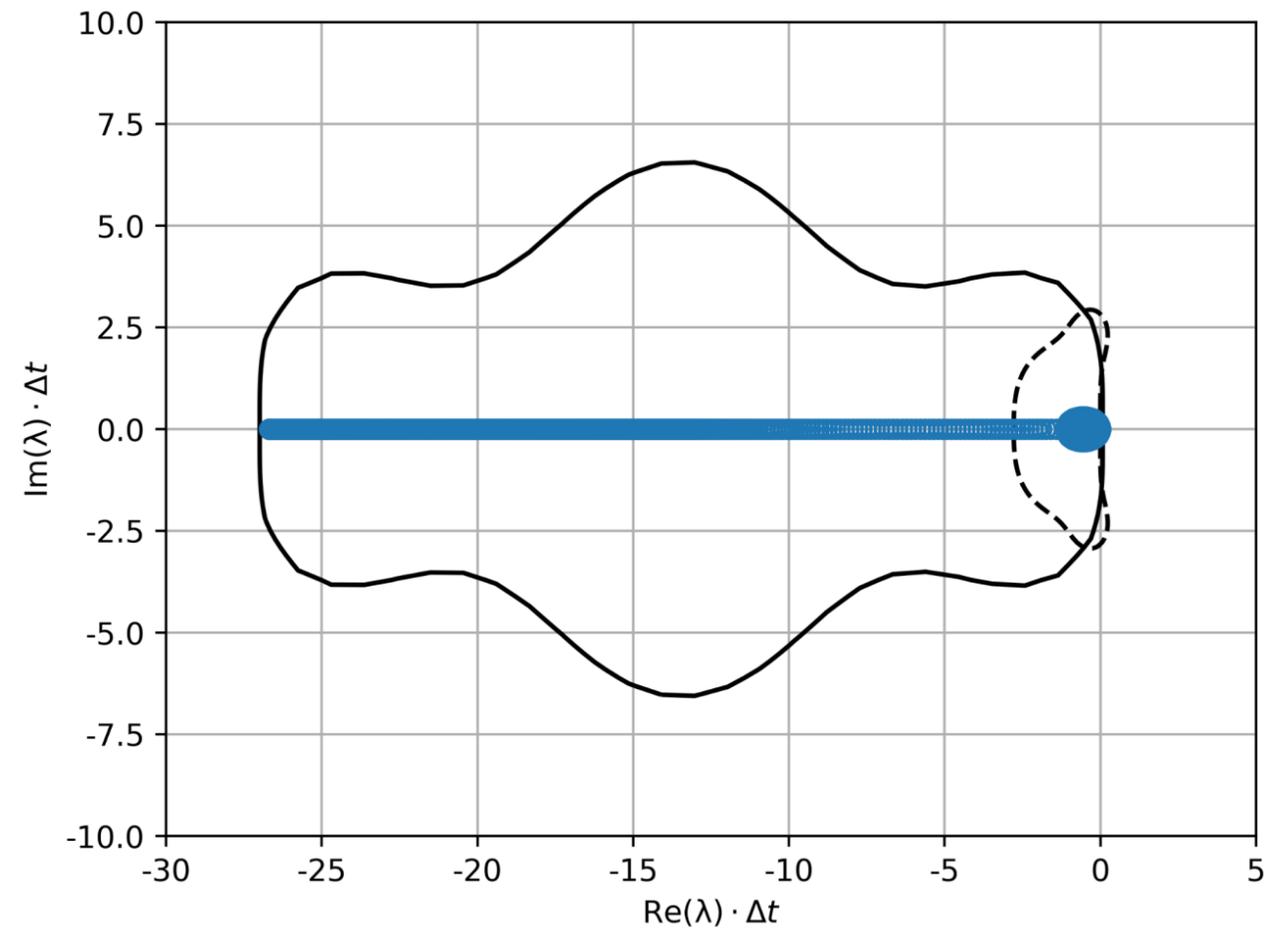
$$B_s = 23 \quad J_{\max} = 7$$

$$L = 4.6 \quad K_\eta = 0.5$$

$$\nu = 6.95 \cdot 10^{-2}$$

$$C_0 = 20.0$$

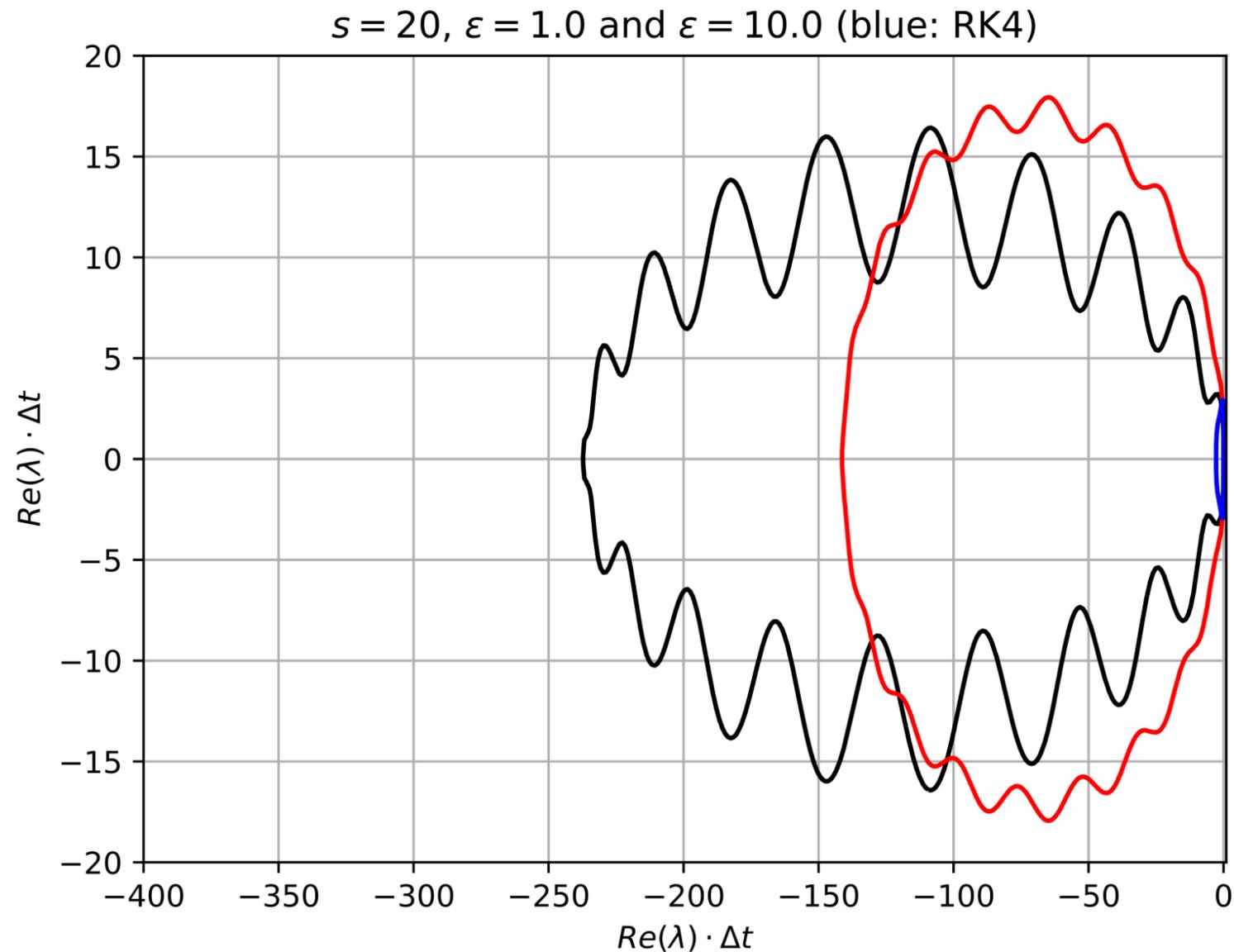
Область устойчивости  
схемы Рунге-Кутты-  
Чебышёва с параметрами  
 $s = 7, \epsilon = 1.76$



1 211 370 вызовов программы вычисления правой части при использовании схемы Рунге-Кутты 4 порядка,  
119 466 вызовов программы вычисления правой части при использовании схемы Рунге-Кутты-Чебышёва.

# Схемы Рунге-Кутты-Чебышёва

- При большом числе ступеней можно добиться очень большой области устойчивости.



Область устойчивости схемы Рунге-Кутты 4 порядка.

# Численная верификация: обтекание круглого цилиндра

Kinematic viscosity  
 $\nu = 20$  and  $2$  (2 cases)

Reynolds number  
 $Re = Ub/\nu = 0.05$  and  $0.5$

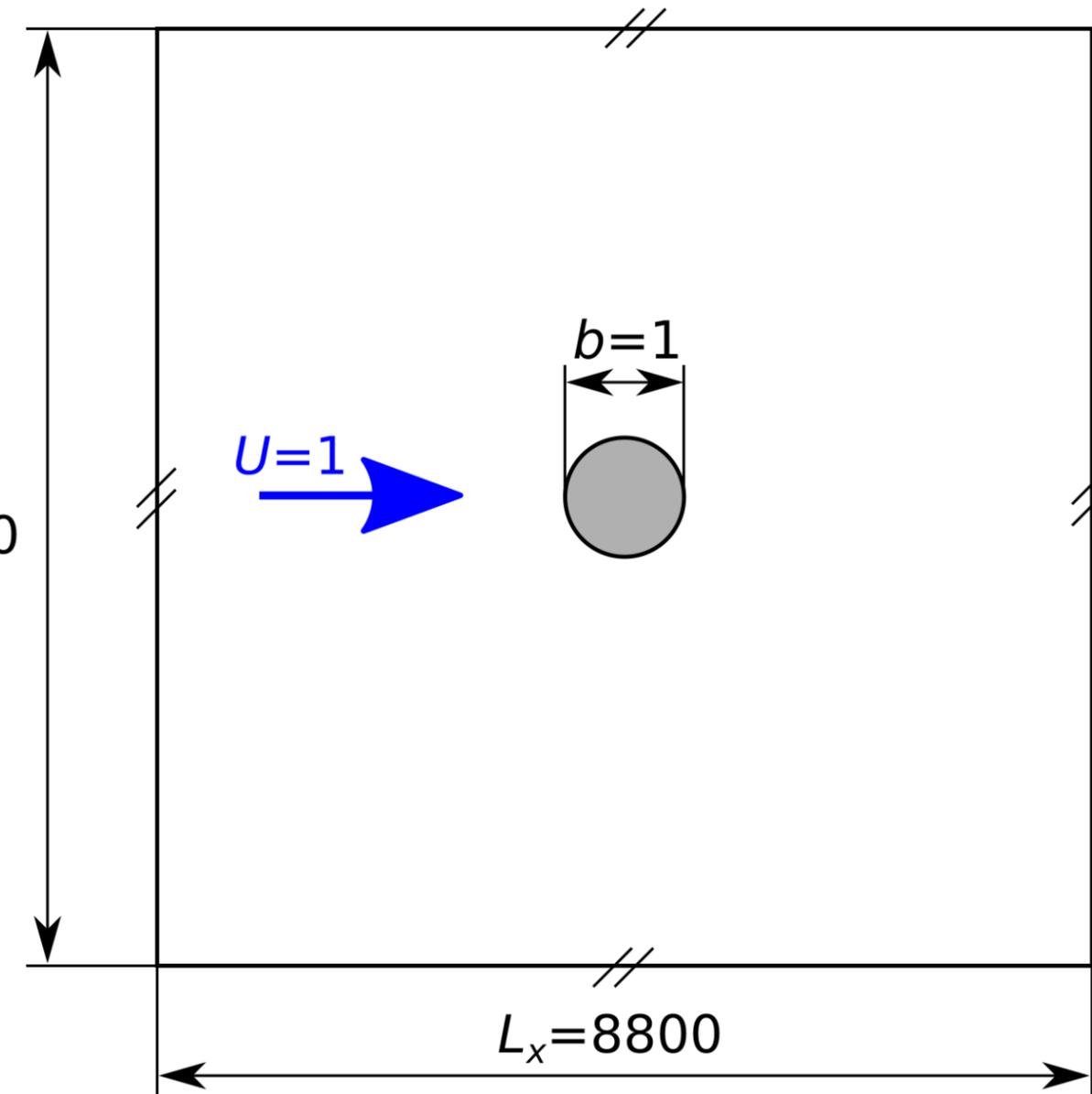
23x23x23 grid points  
per block

$L_y = 8800$

Number of refinement levels  
10, 11, 12 and 13 (4 cases)

Artificial speed of sound  
 $c_0 = 30.38$

Density  
 $\rho = 1$



The volume penalization parameter is  $C_\eta = (0.5\Delta x_{min})^2 \nu^{-1}$

# Коэффициент сопротивления цилиндра

	$Re_b = 0.05$			$Re_b = 0.5$		
	$C_D$	$C_{Dp}/C_D$	$C_{D\tau}/C_D$	$C_D$	$C_{Dp}/C_D$	$C_{D\tau}/C_D$
Present work, $\frac{b}{\Delta x_{min}} = 2.56$	96.23	0.29	0.71	15.51	0.29	0.71
Present work, $\frac{b}{\Delta x_{min}} = 5.12$	99.51	0.36	0.64	16.30	0.36	0.64
Present work, $\frac{b}{\Delta x_{min}} = 10.24$	100.93	0.42	0.58	16.63	0.42	0.58
Present work, $\frac{b}{\Delta x_{min}} = 20.48$	101.38	0.46	0.54	16.70	0.46	0.54
Dennis and Shimshoni (1965)	98.56	0.50	0.50	17.06	0.50	0.50
Khalili and Liu (2017)	96.58	-	-	16.49	-	-

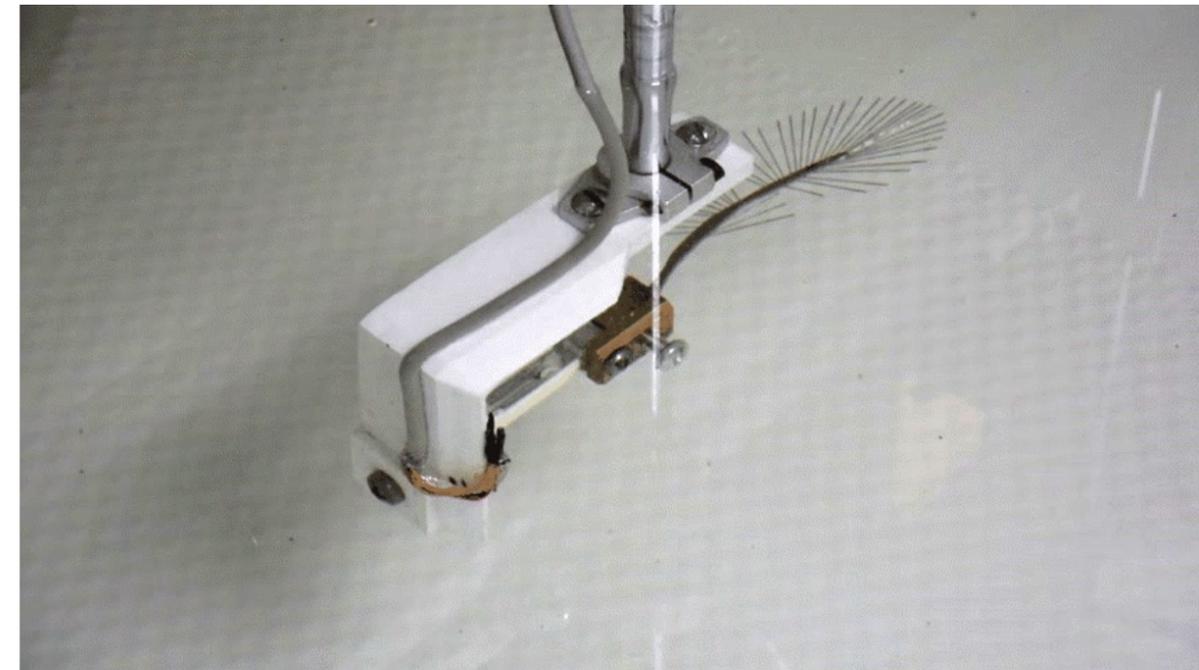
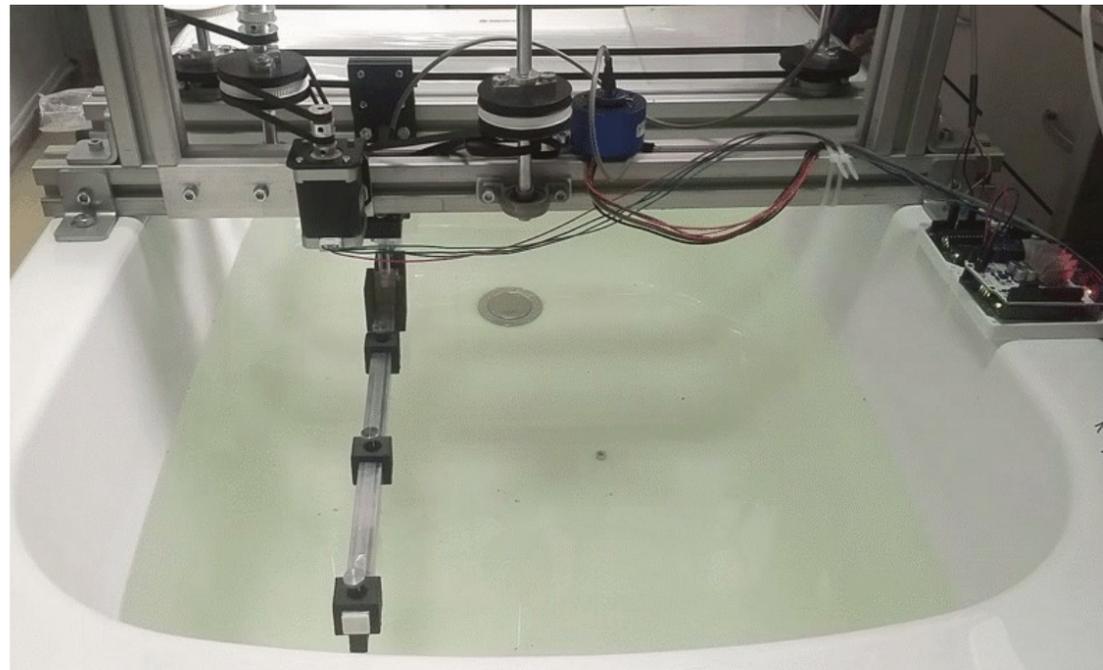
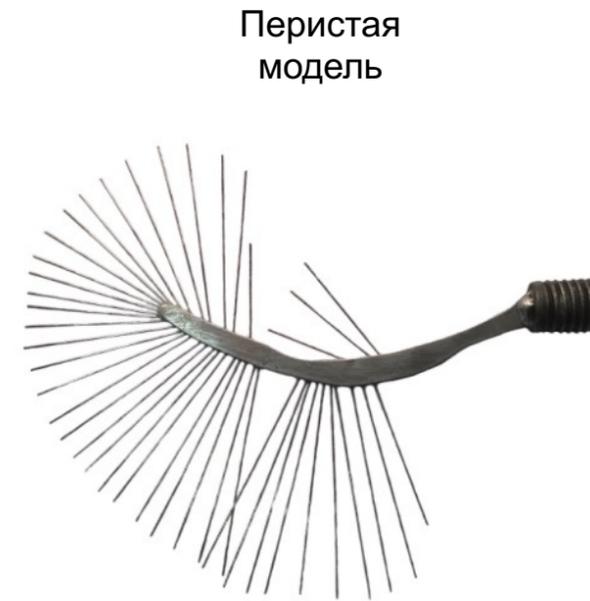
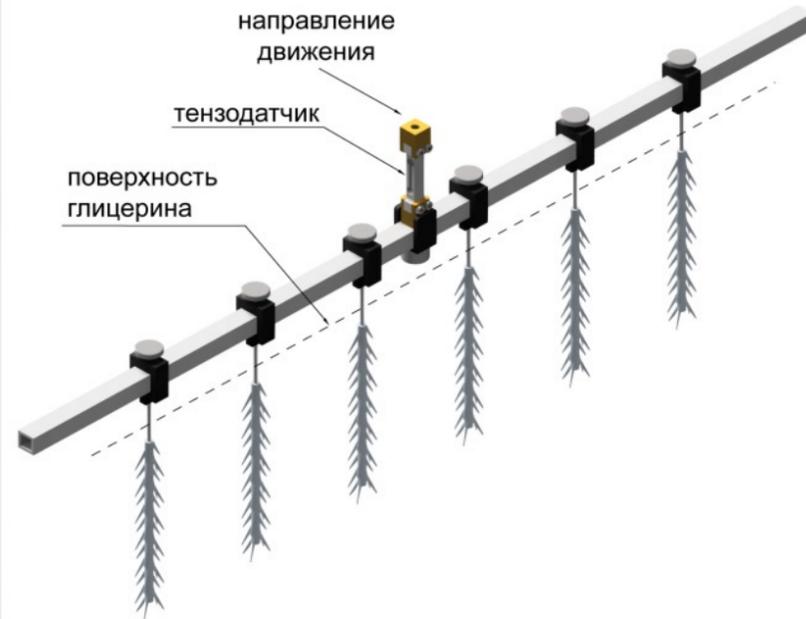
Коэффициент силы сопротивления:  $C_D = \frac{2D}{\rho U^2 b}$

Коэффициент силы сопротивления давления:  $C_{Dp} = \frac{2D_p}{\rho U^2 b}$

Коэффициент силы сопротивления трения:  $C_{D\tau} = \frac{2D_\tau}{\rho U^2 b}$

Результаты на момент времени  $t_{max} = 250$  конвективных единиц

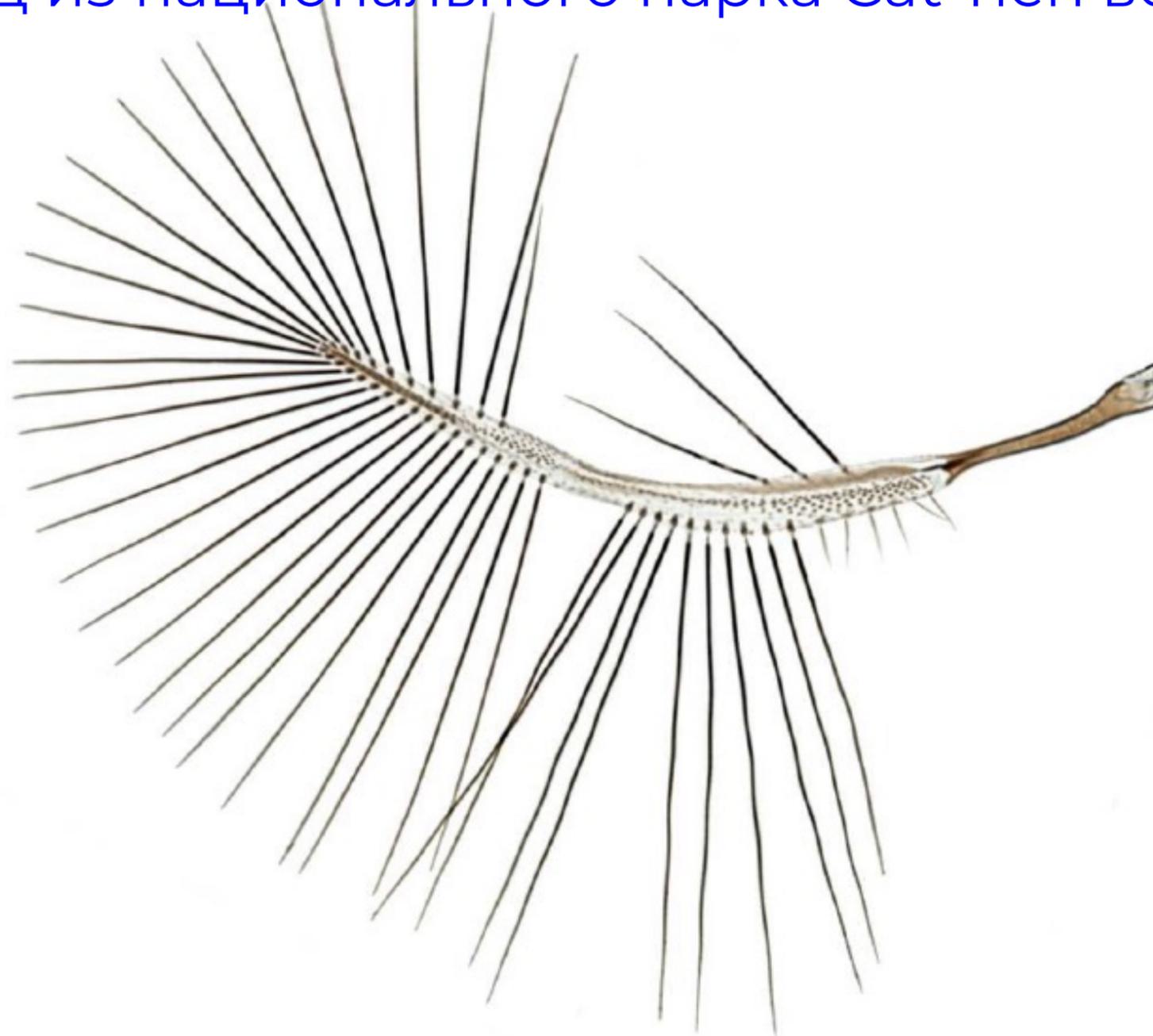
# Аэродинамическое моделирование перистого крыла



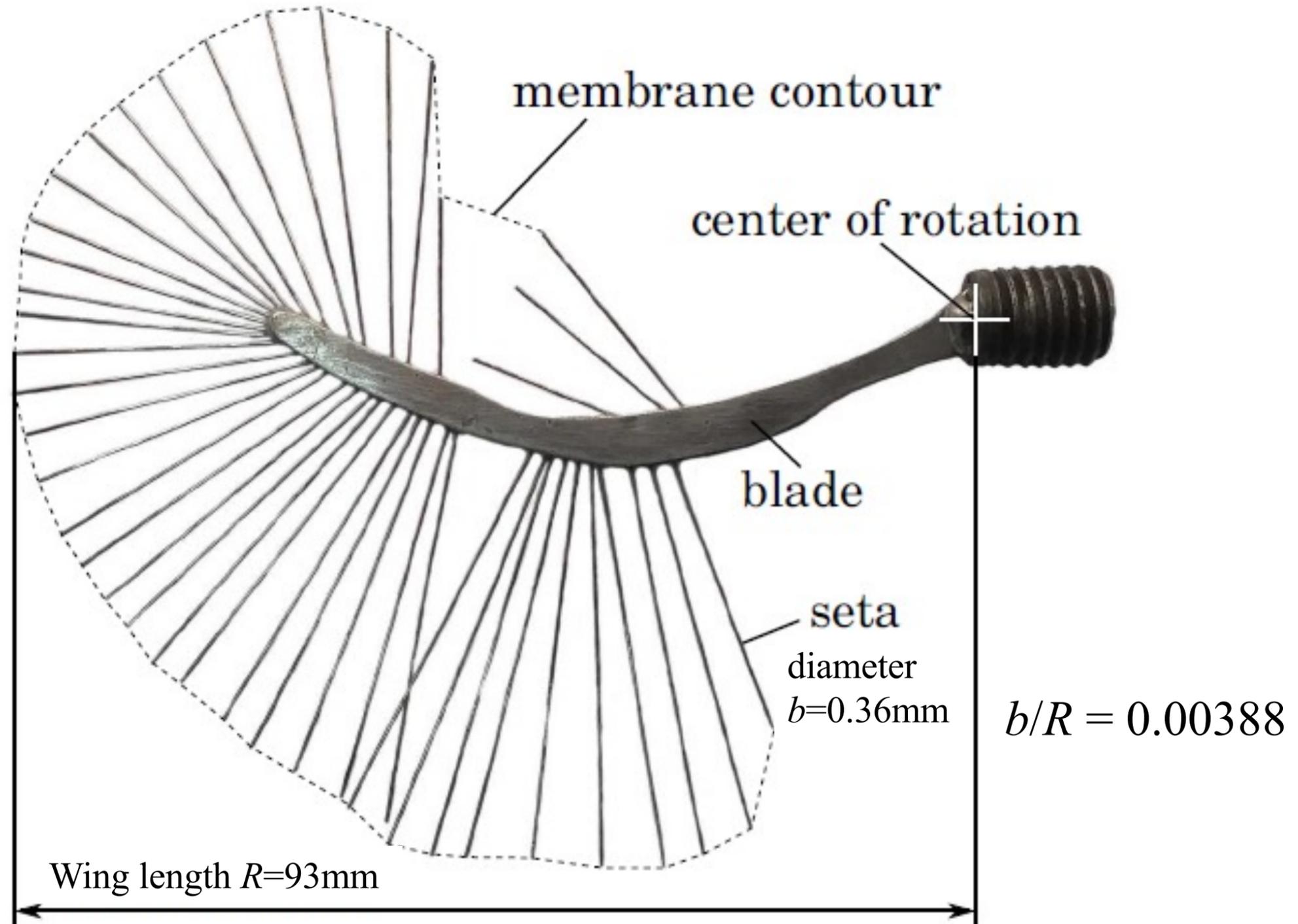
# Форма крыла

Крыло мельчайшего жука *Paratiposa placentis* (Deane, 1931)

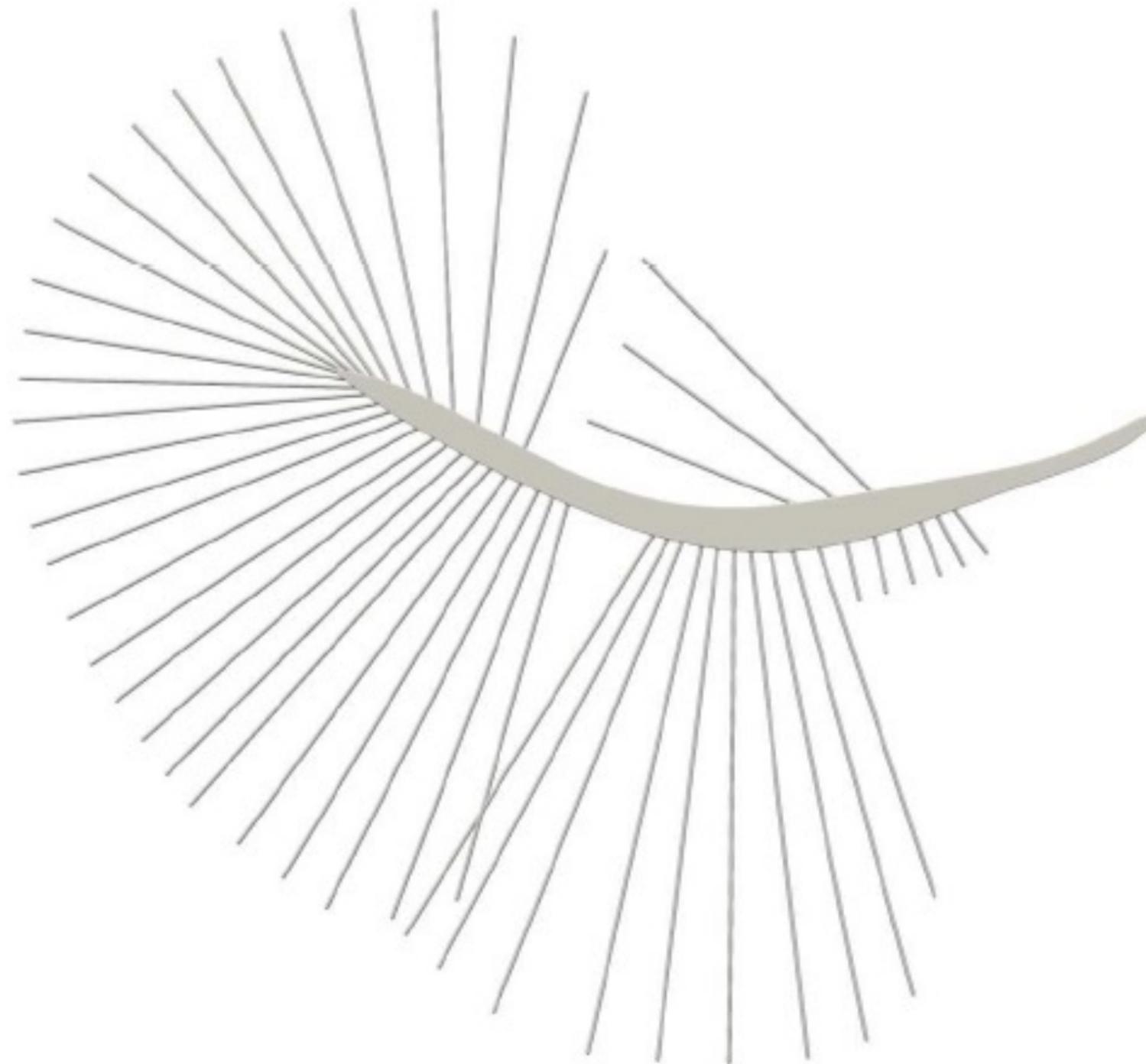
Образец из национального парка Cát Tiên во Вьетнаме



# Форма крыла (масштабный эксперимент)

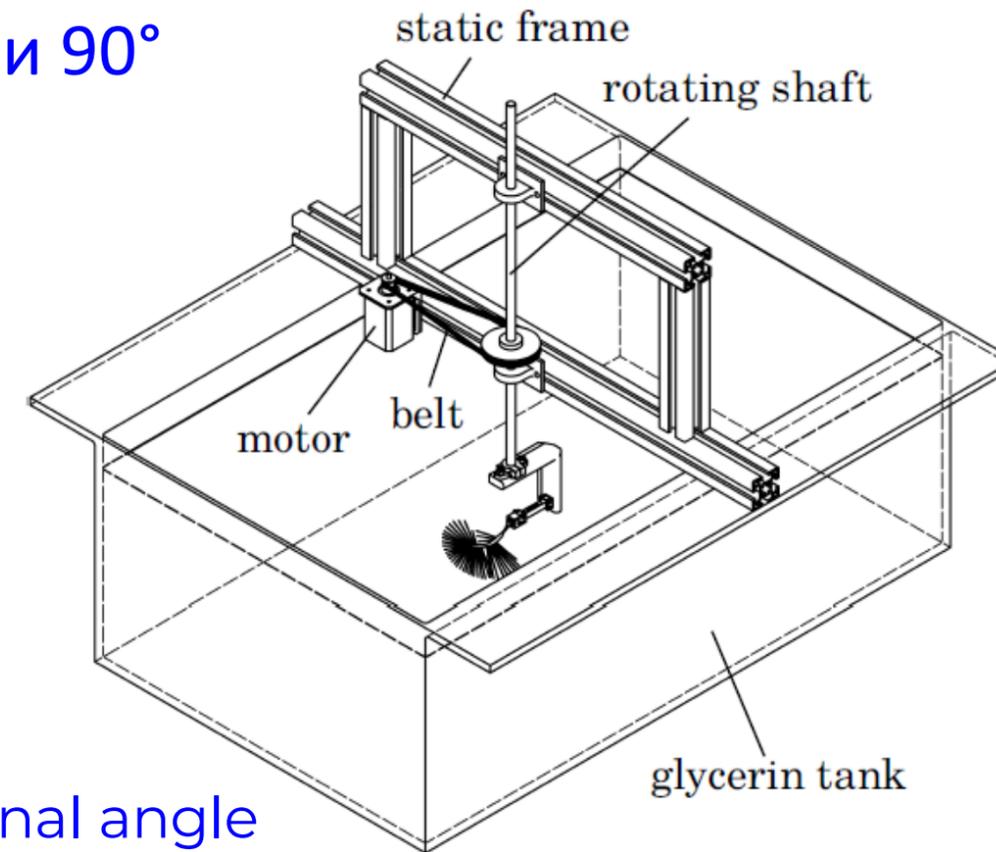
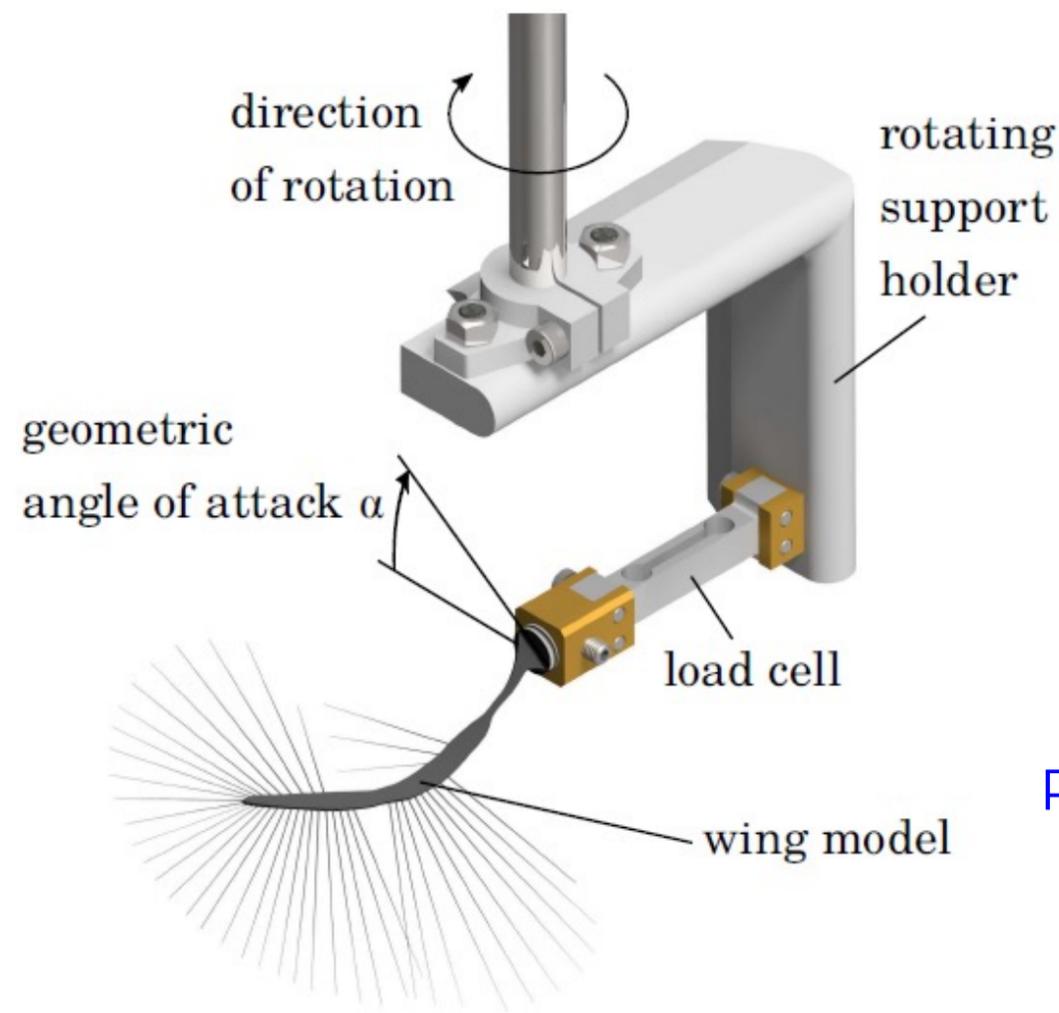


# Форма крыла (численное моделирование)



# Масштабное моделирование вращающегося крыла

- Раствор глицерина в воде, ванна размерами 50 см × 80 см × 25 см
- Кинематическая вязкость  $\nu = 360 \text{ мм}^2 \text{ с}^{-1}$
- Частота вращения  $f = 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2$  и  $0.4$  об/с
- $Re = \Omega r_g c_{mean} / \nu = 2.0, 4.0, 5.9, 7.9, 9.9, 19.8$  и  $34.6$
- $^\circ, 75^\circ$  и  $90^\circ$

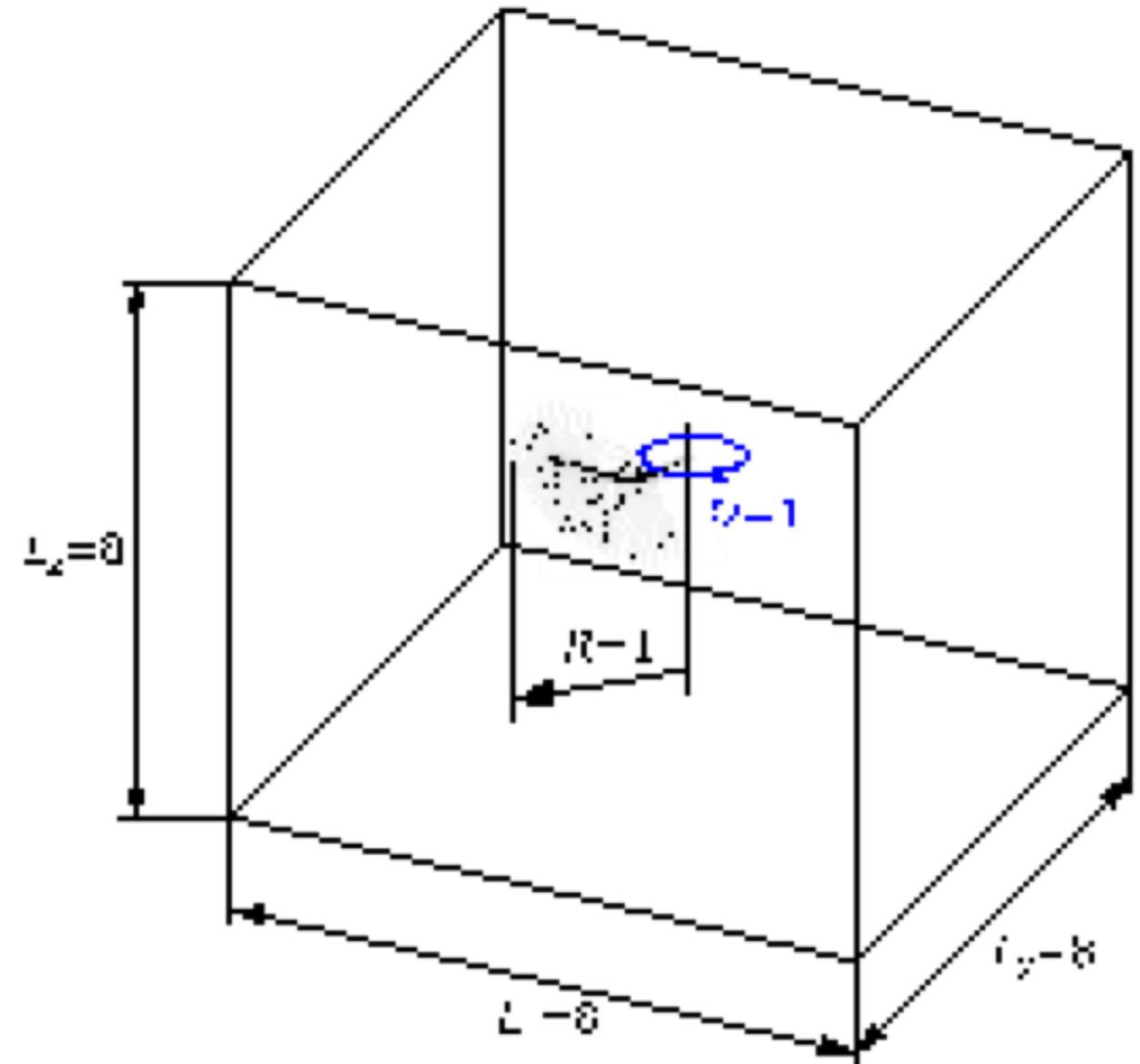


Positional angle

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \Omega^2 t^2, & \text{if } \Omega t < \pi/8. \\ \Omega t - \pi/16, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

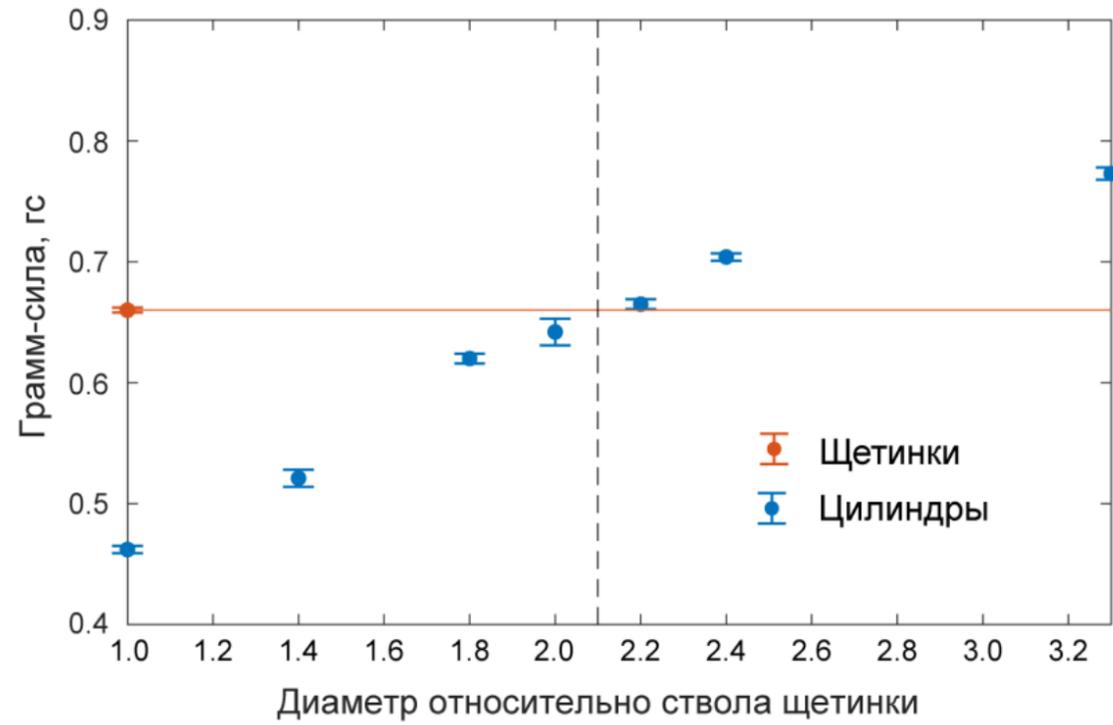
# Численное моделирование вращающегося крыла

- Значения всех физических параметров заданы исходя из динамического подобия эксперименту
- $J_{max}=8$  уровней адаптации сетки
- $23 \times 23 \times 23$  узлов сетки на блок
- Шаг сетки в 6 раз меньше диаметра щетинки
- Искусственная скорость звука  $c_0 = 30.38 \Omega R$
- Объемный штрафной параметр  $C_\eta = 7.82 \times 10^{-6} / \Omega$
- Порог вейвлет-коэффициентов  $\varepsilon = 10^{-3}$

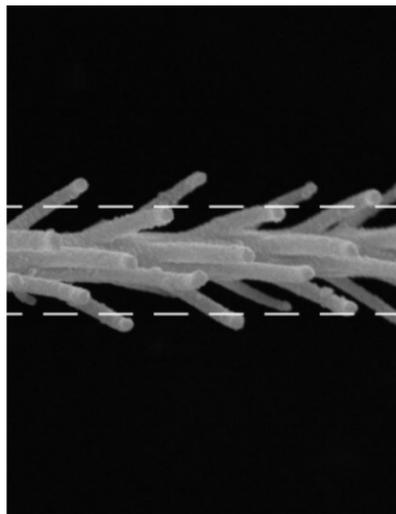
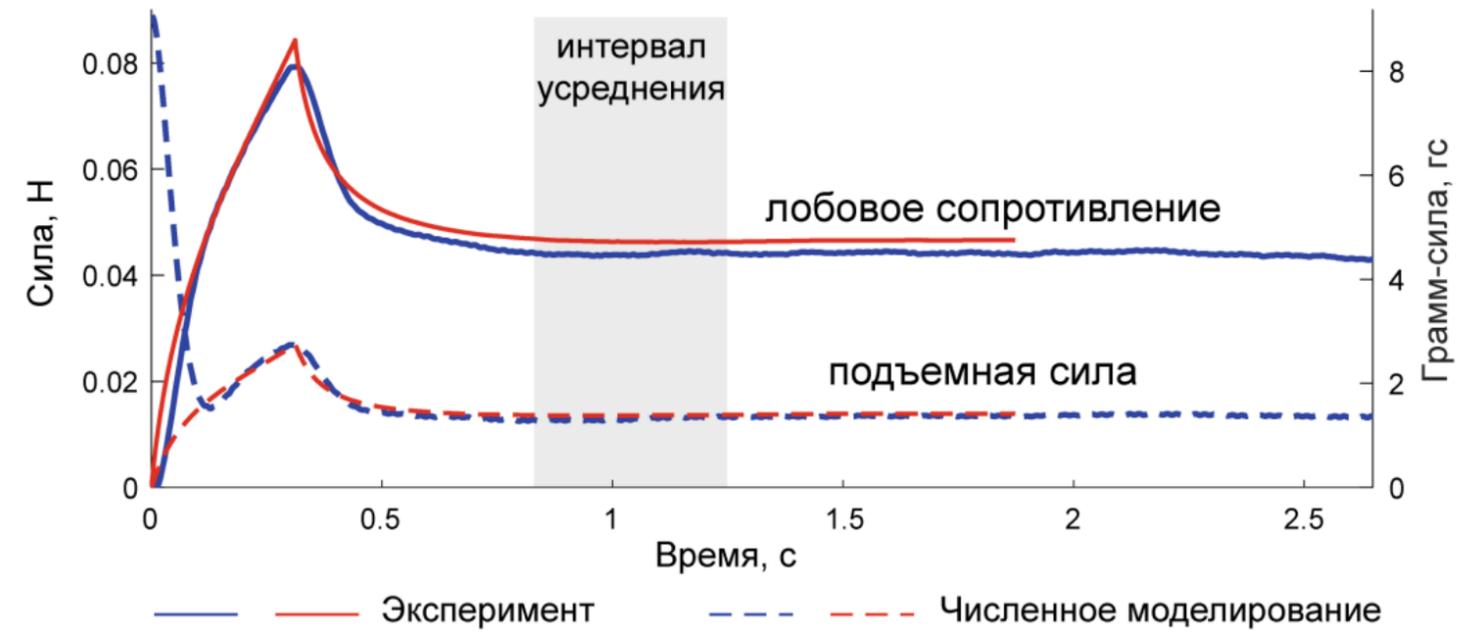


# Аэродинамические силы

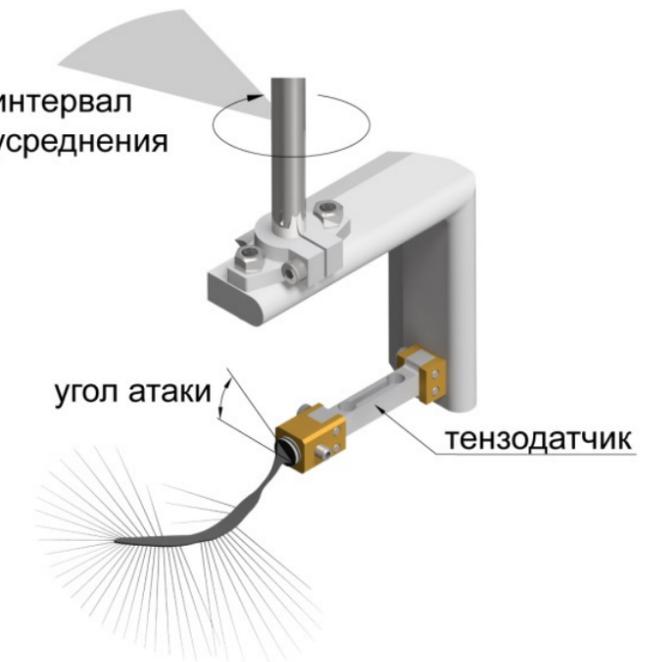
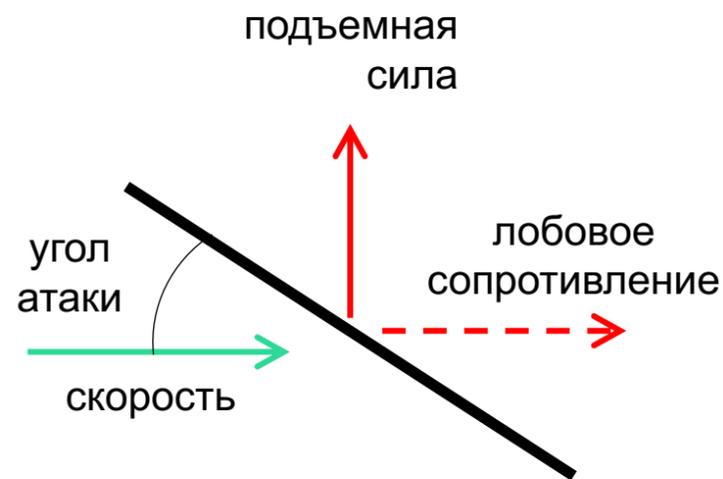
Лобовое сопротивление щетинок и цилиндров



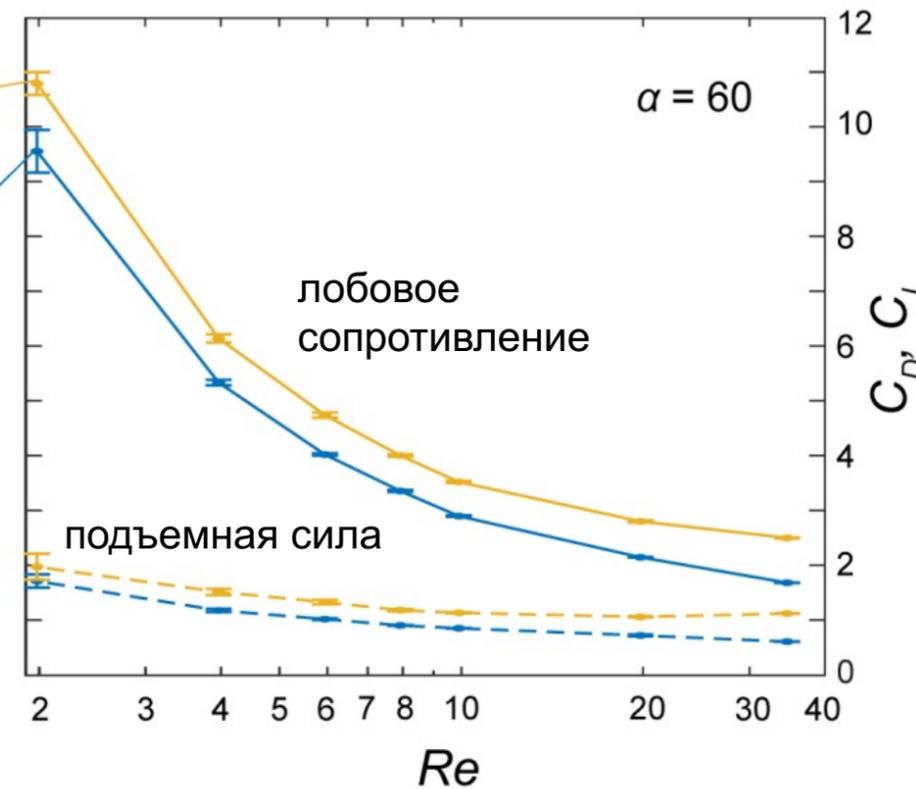
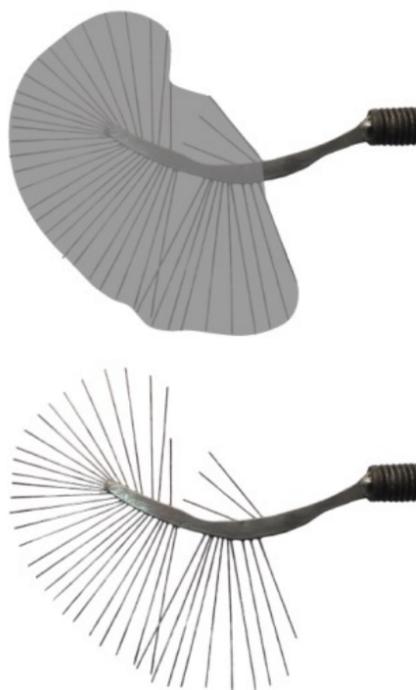
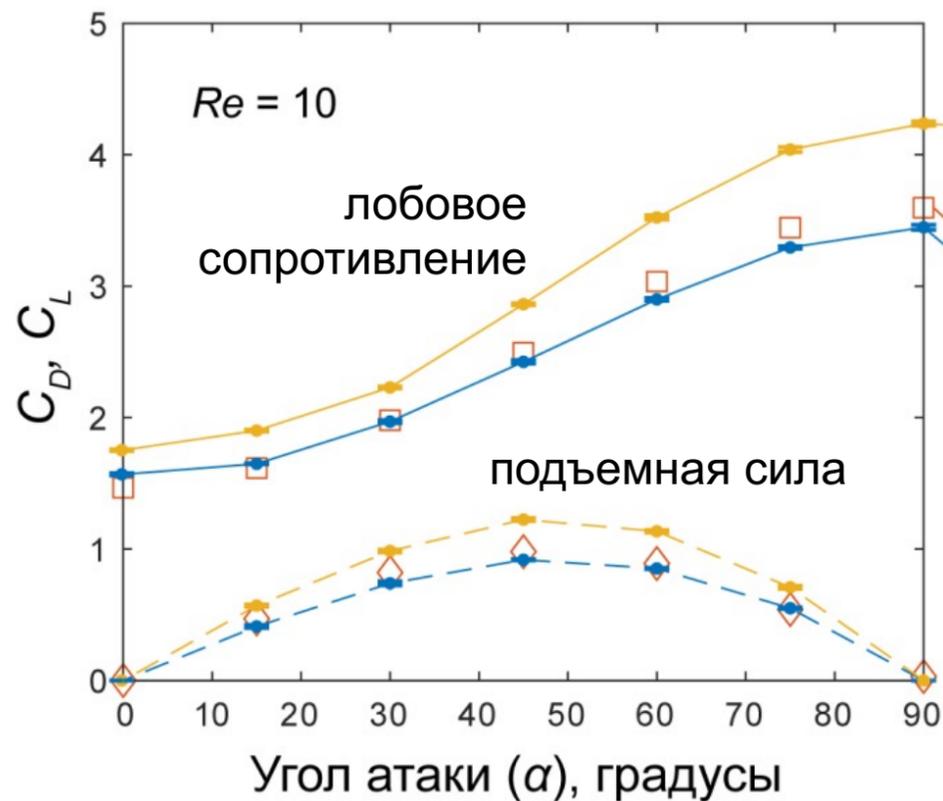
Динамика сил в эксперименте и расчете



эффективный диаметр = 2.1 диаметра ствола

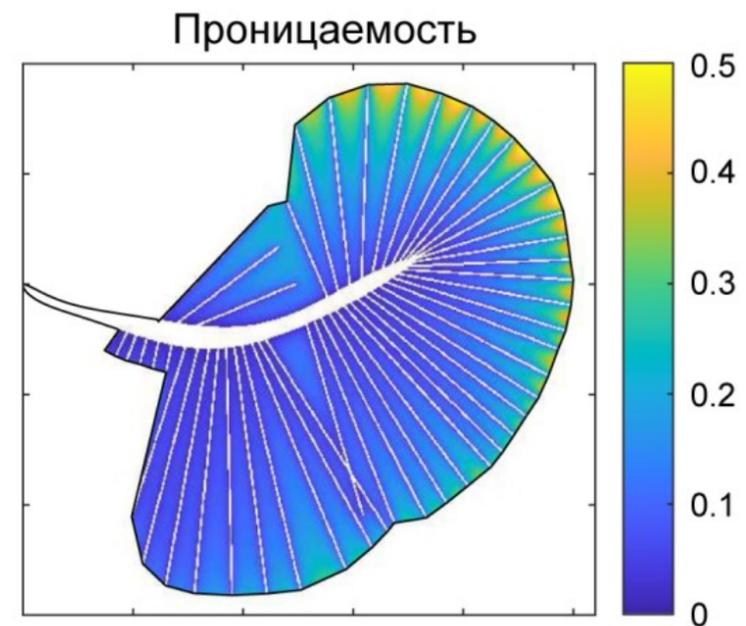
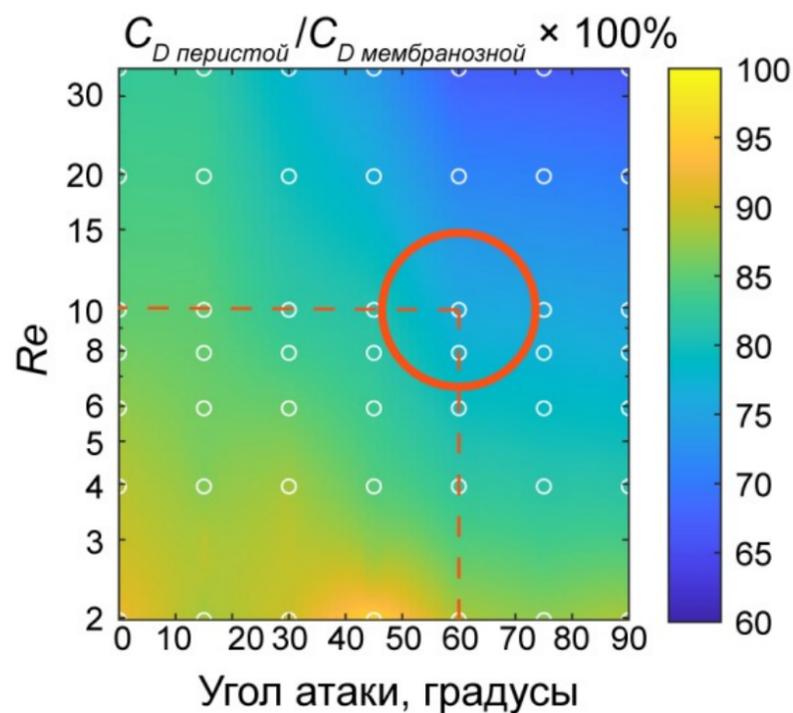


# Перистое крыло в сравнении с мембранозным



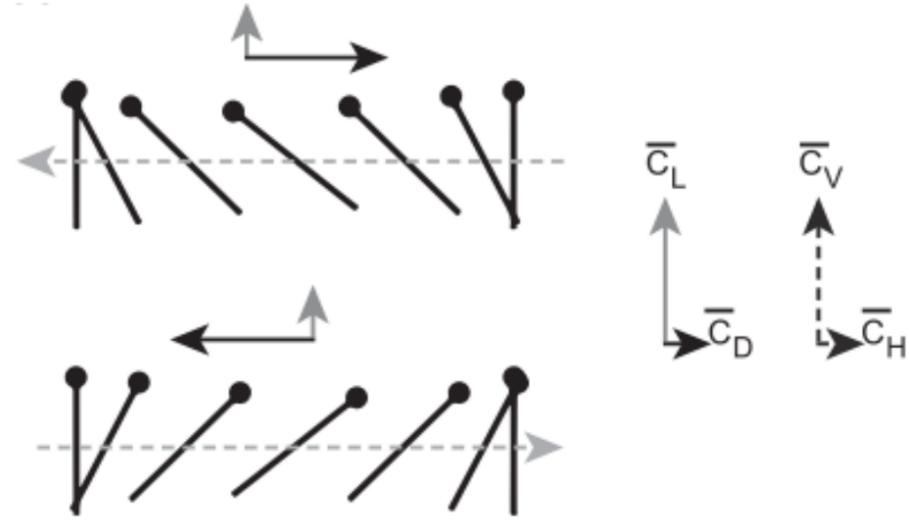
- $C_D$  перистой модели, эксперимент
- $C_D$  перистой модели, CFD
- $C_D$  мембранозной модели, эксперимент
- -  $C_L$  перистой модели, эксперимент
- ◇  $C_L$  перистой модели, CFD
- -  $C_L$  мембранозной модели, эксперимент

$$C_L = \frac{2L}{\rho \cdot V_g^2 \cdot S} \quad C_D = \frac{2D}{\rho \cdot V_g^2 \cdot S}$$

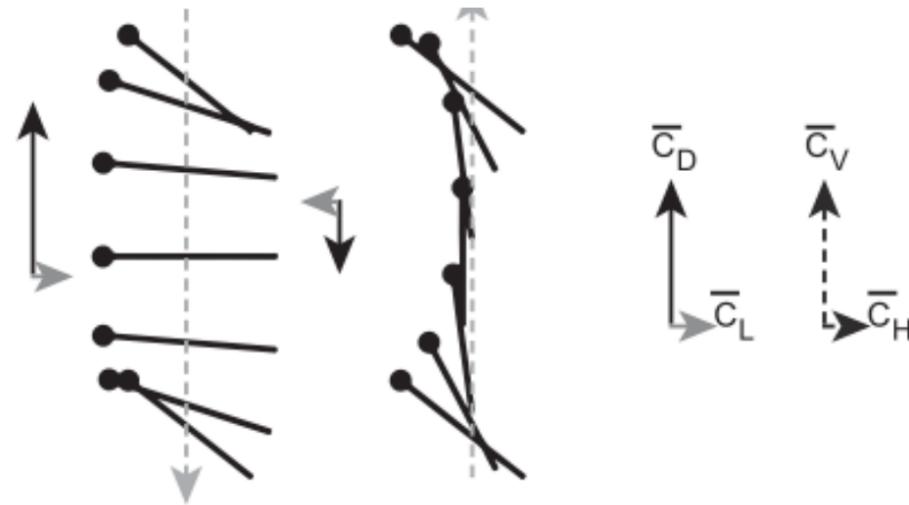


# Два разных способа машущего полёта

Полёт с помощью силы Жуковского



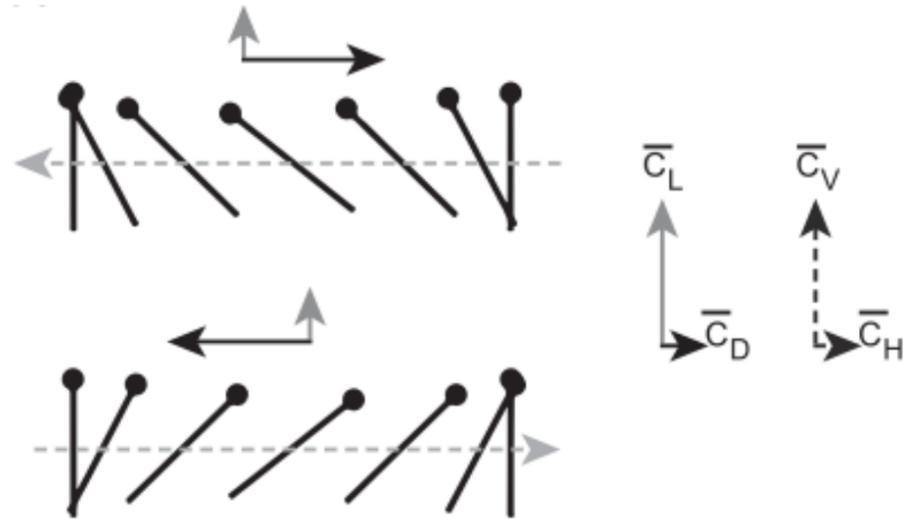
Полёт с помощью силы сопротивления



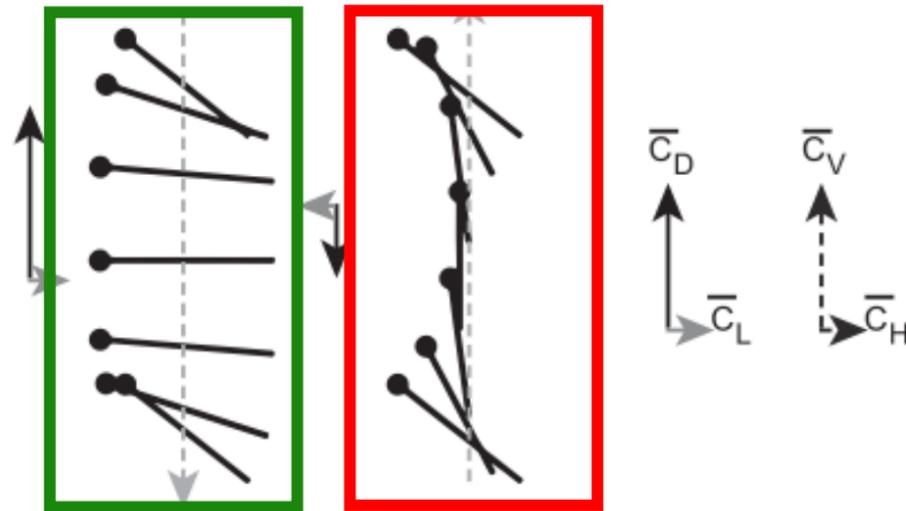
Jones et al, JTB 2015

# Два разных способа машущего полёта

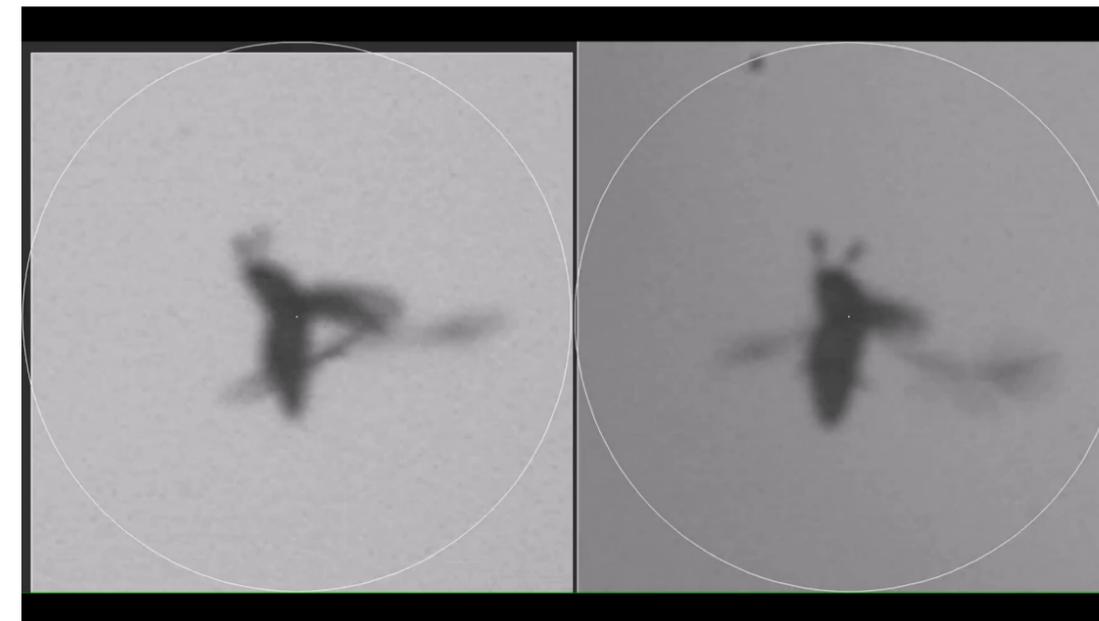
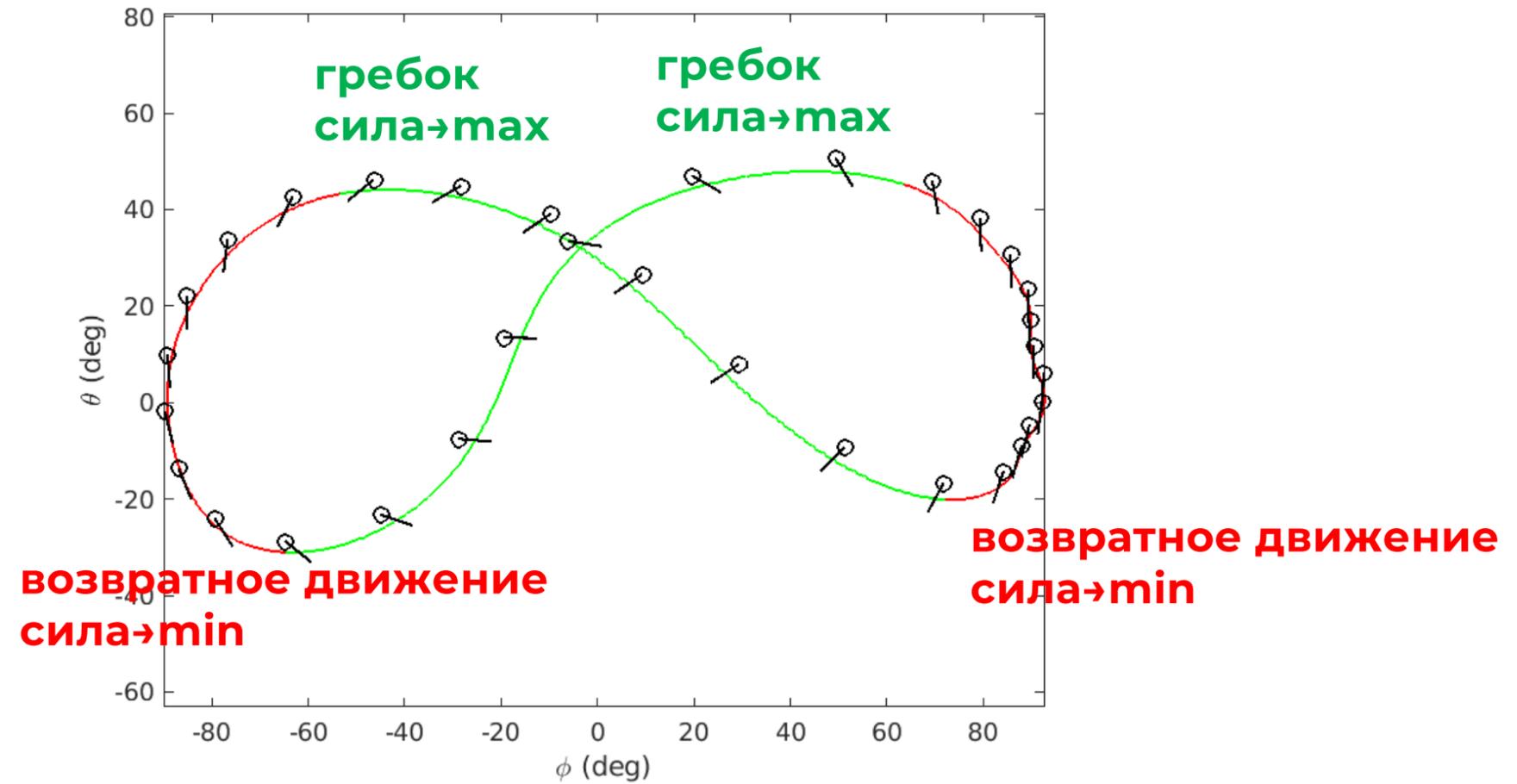
Полёт с помощью силы Жуковского



Полёт с помощью силы сопротивления



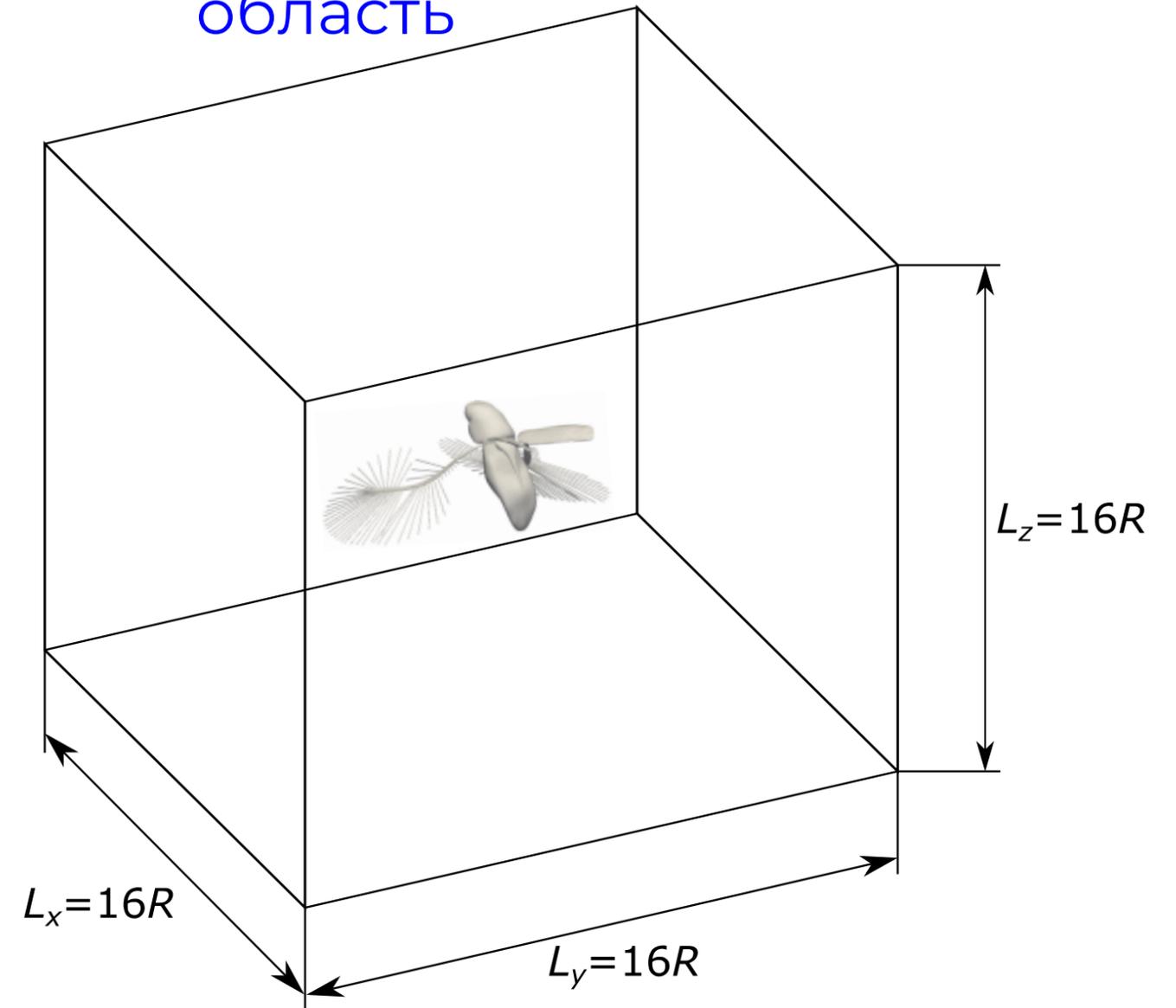
Jones et al, JTB 2015



# Численное моделирование машущего полёта

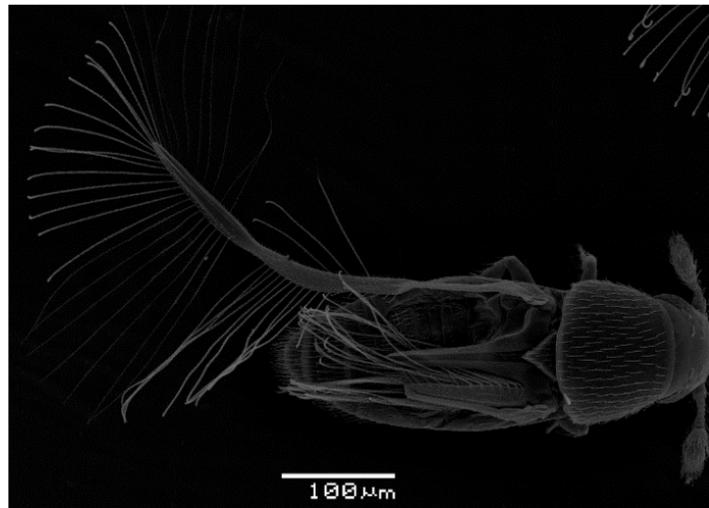
- Полёт на месте ( $V/fR < 0.2$ )
- Температура воздуха  $24^\circ\text{C}$
- Частота взмахов  $f = 184 \pm 8$  Гц
- Длина крыла  $R = 0.49$  мм
- $25 \times 25 \times 25$  узлов сетки на блок
- Шаг сетки в 6 раз меньше диаметра щетинки
- Искусственная скорость звука  $c_0 = 25fR^2$
- Объемный штрафной параметр  $C_\eta \propto (\Delta x_{\min})^2/\nu$
- Порог вейвлет-коэффициентов  $\varepsilon = 10^{-2}$

- Расчётная область

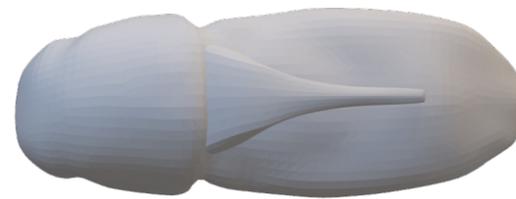


# Геометрическая и кинематическая модель

*Paratuposa placentis*



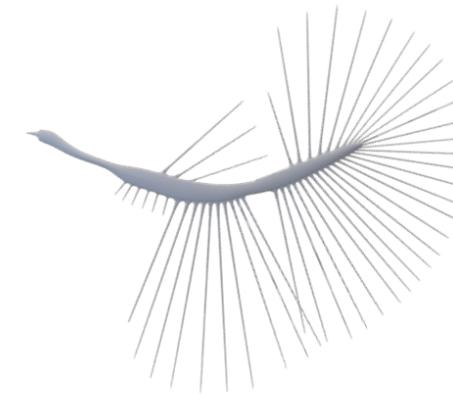
Тело



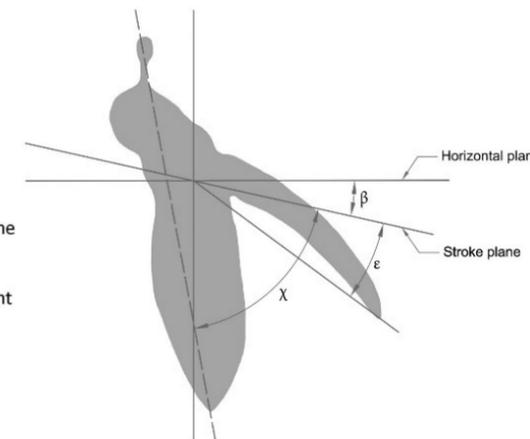
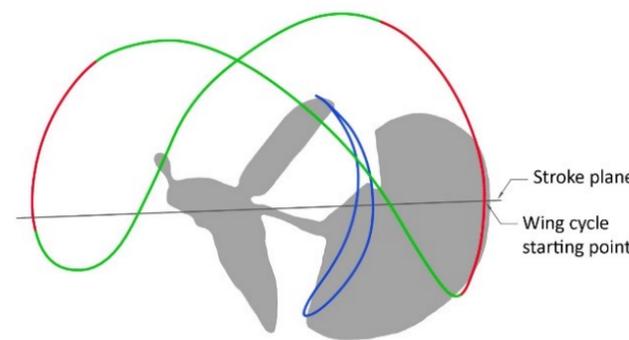
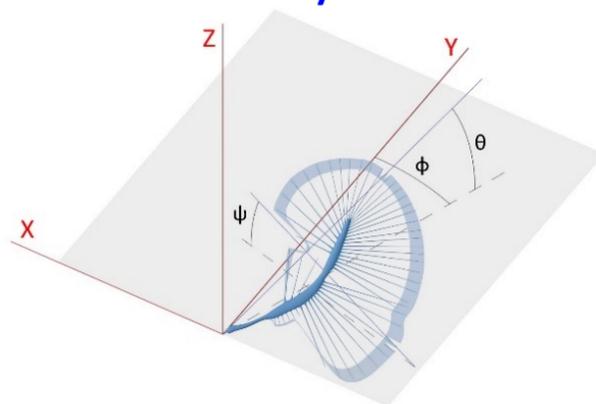
Надкрылье



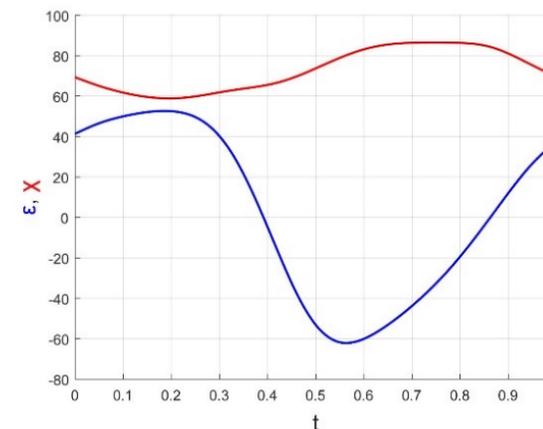
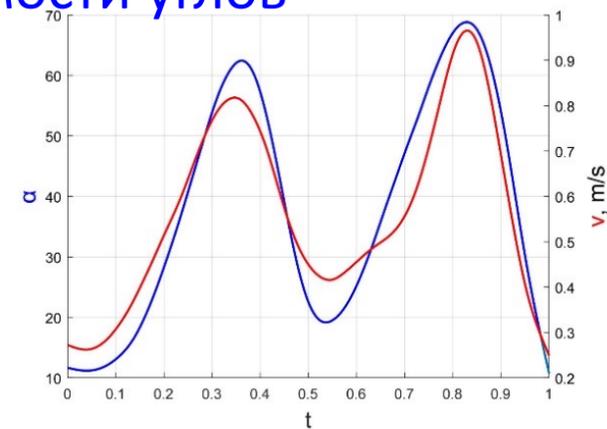
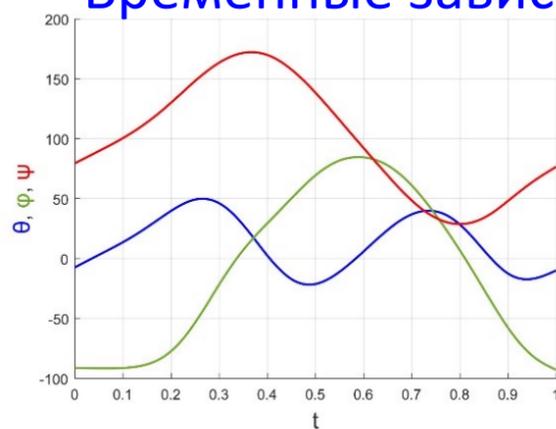
Крыло



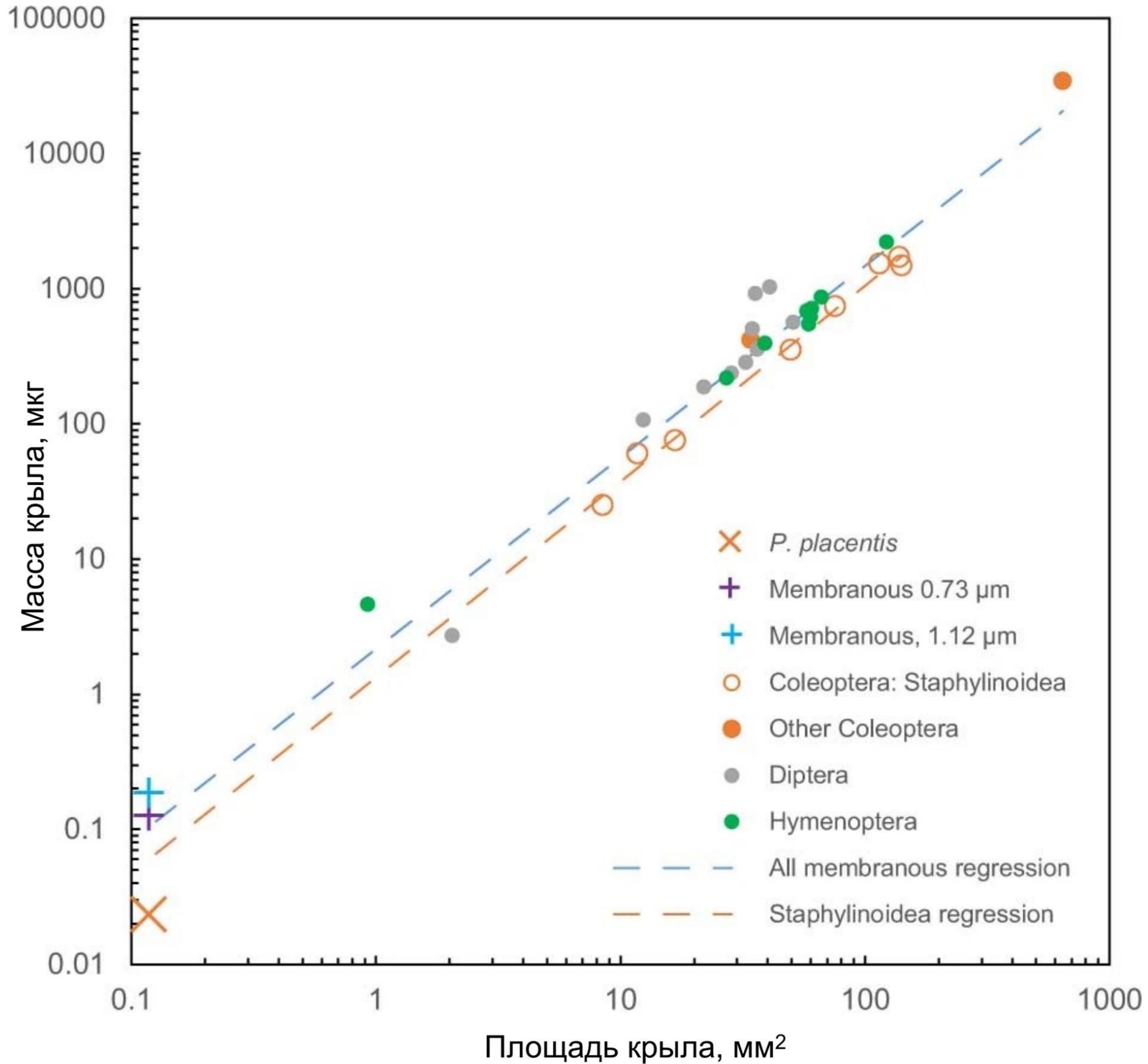
Описание углов



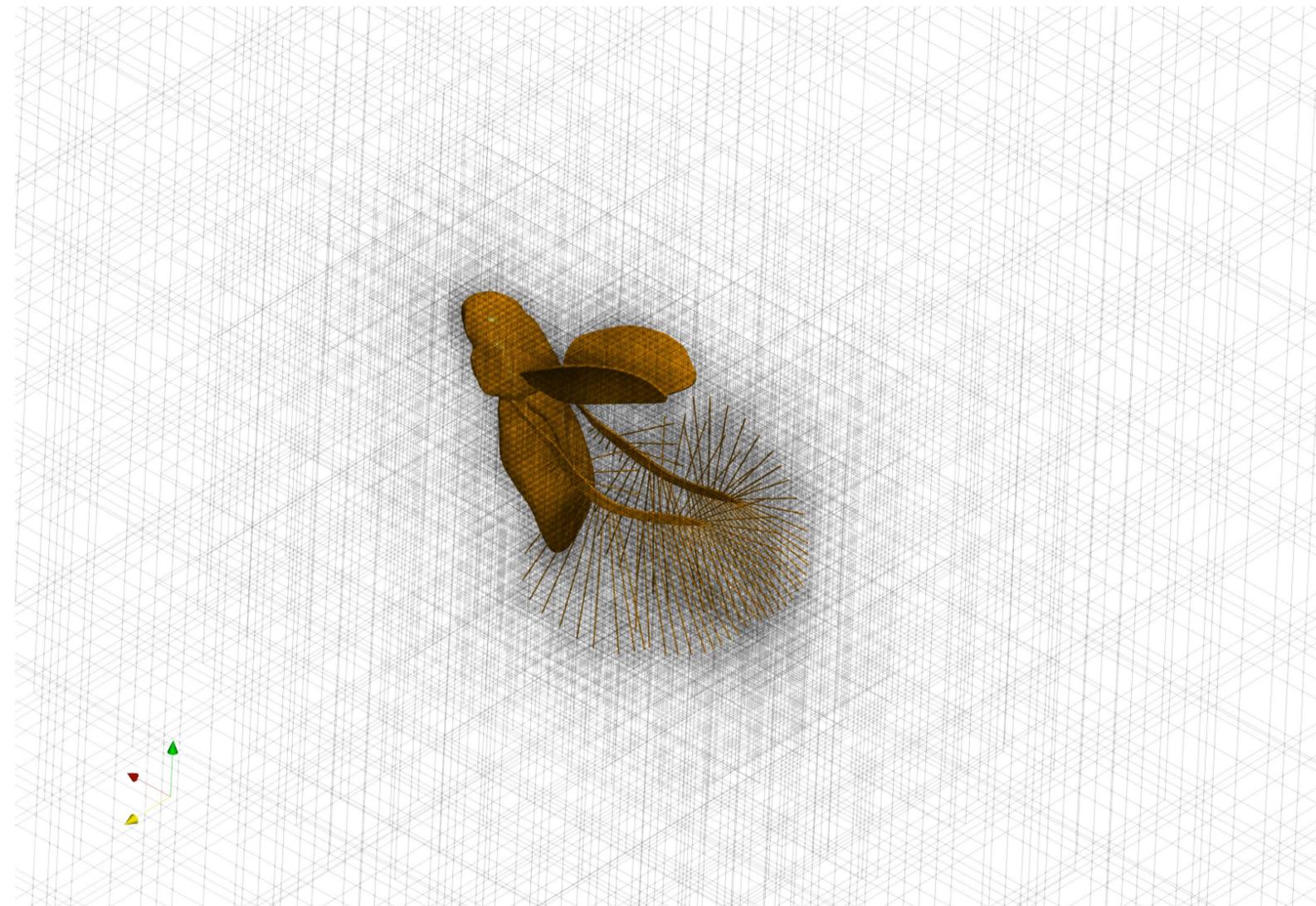
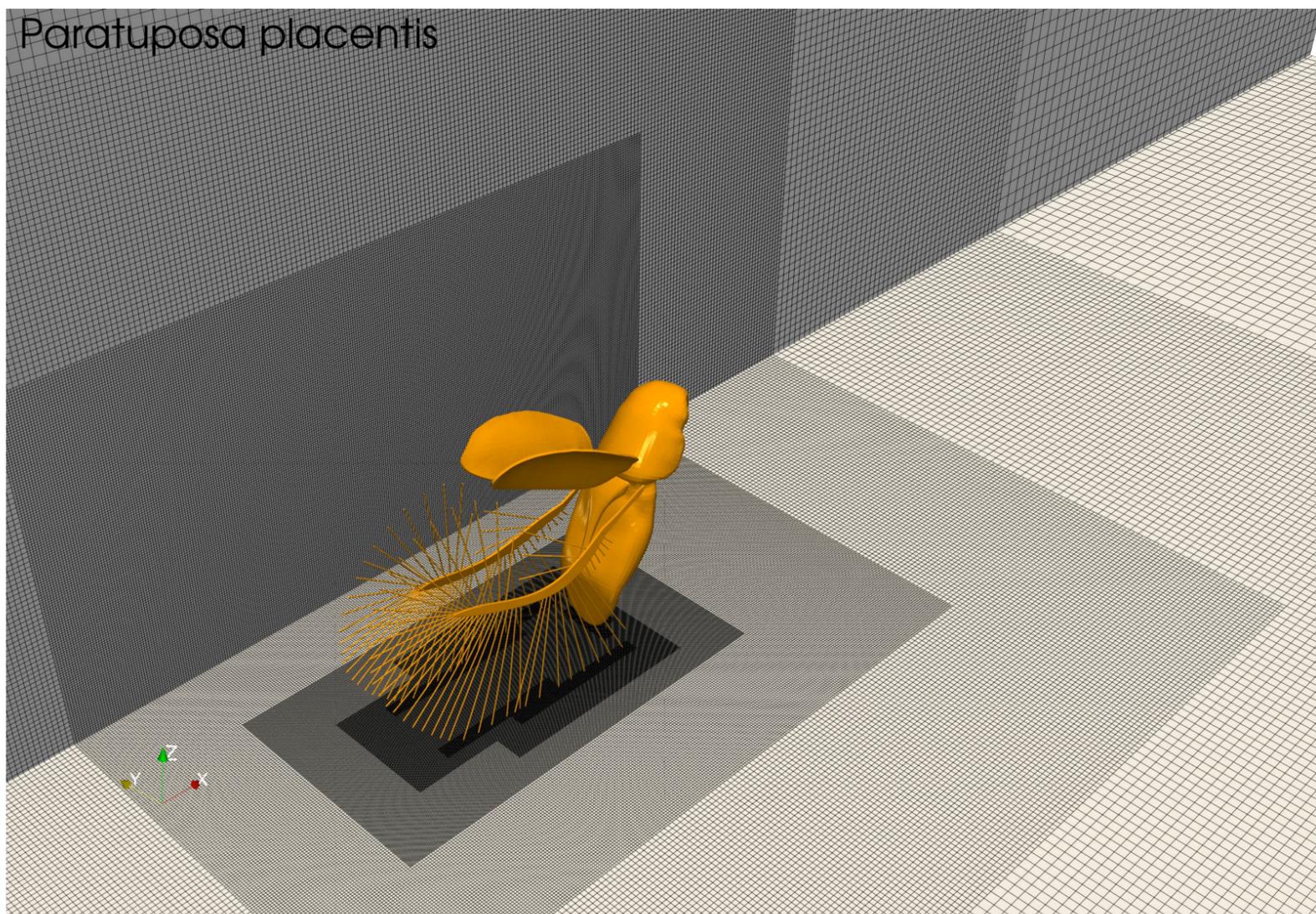
Временные зависимости углов



# Масса мембранозных крыльев



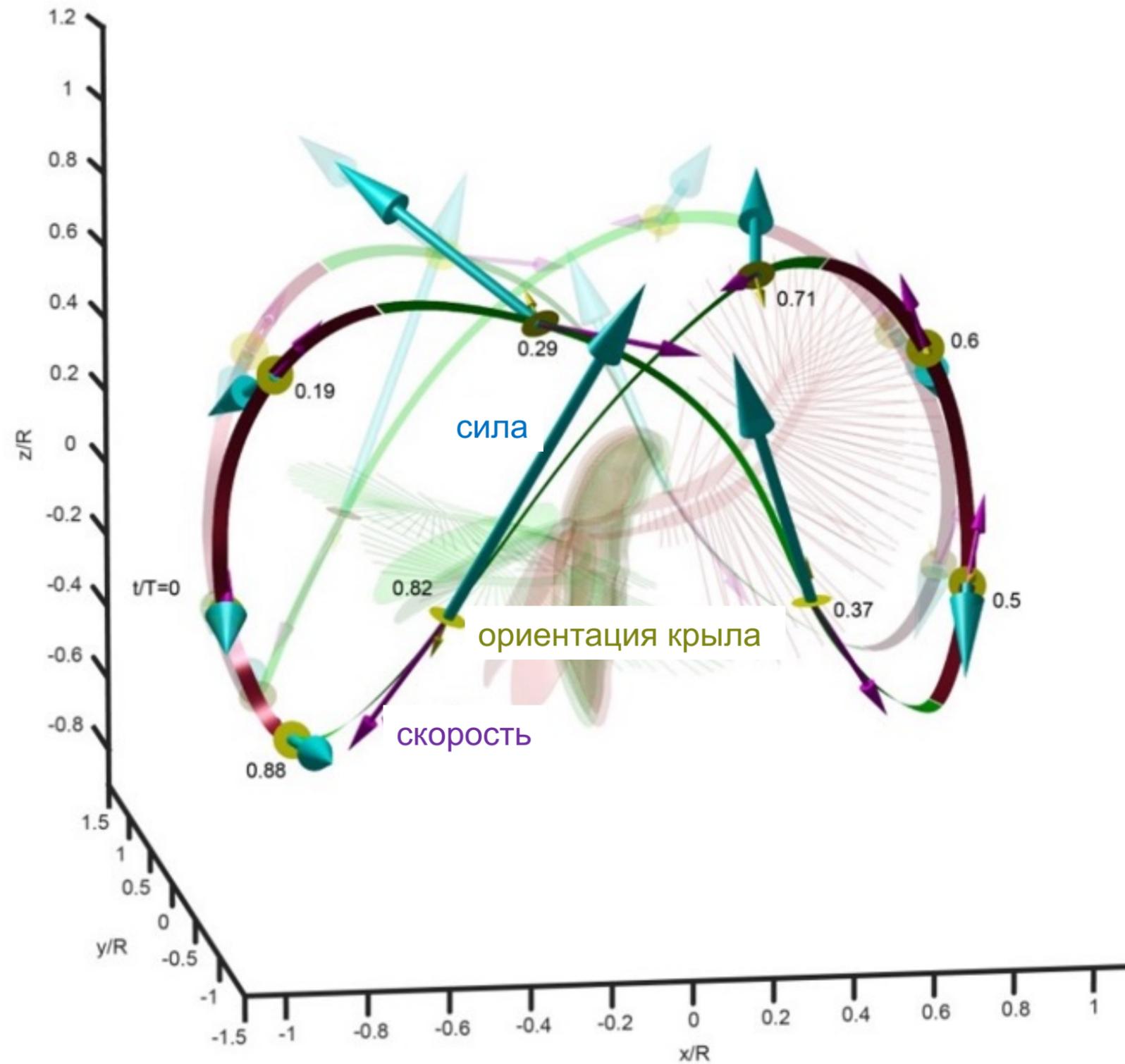
# Динамическая адаптация сетки



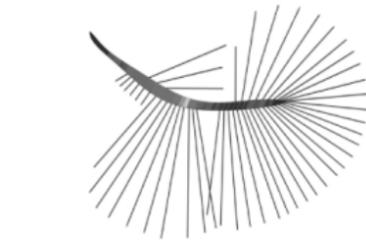
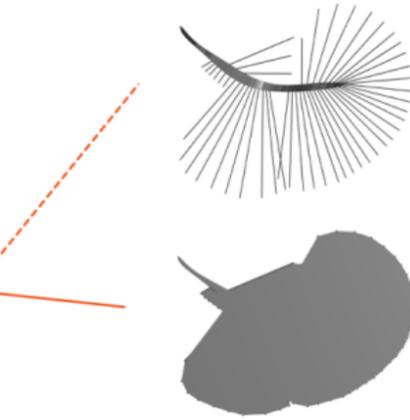
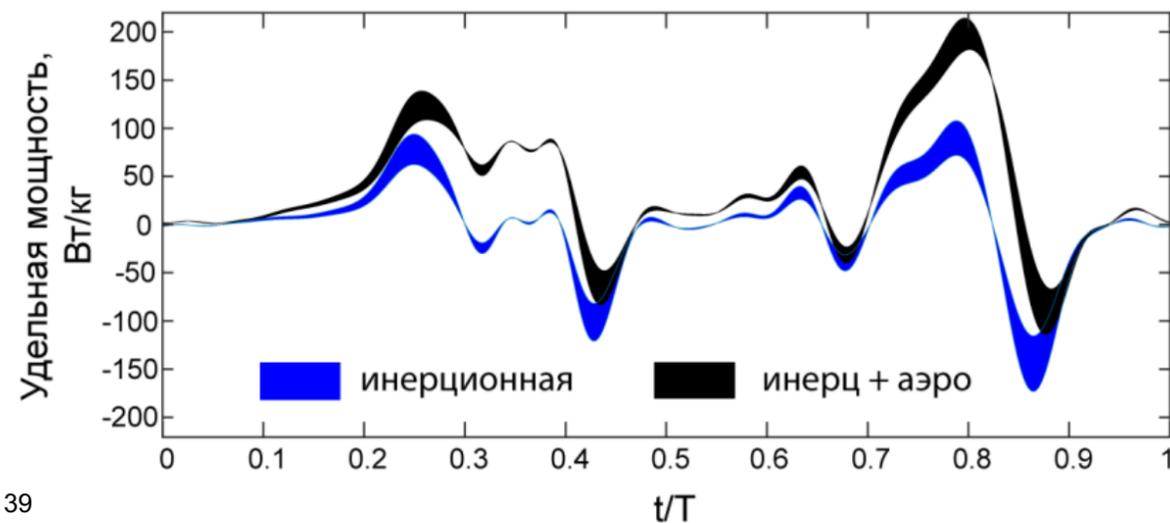
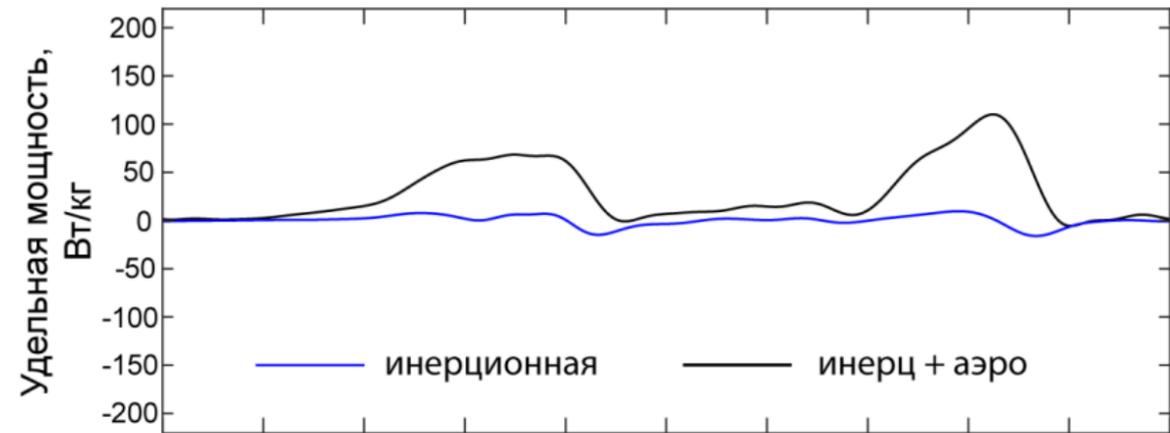
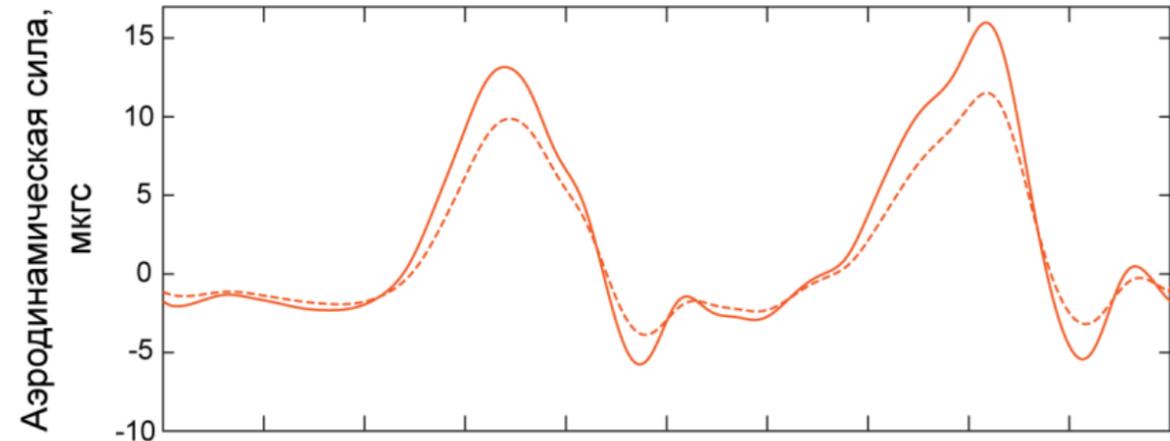
# Визуализация результатов расчёта



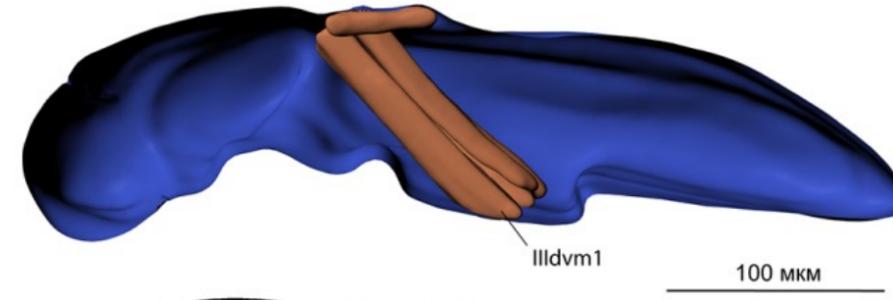
# Диаграмма сил



# Аэродинамические и инерционные нагрузки

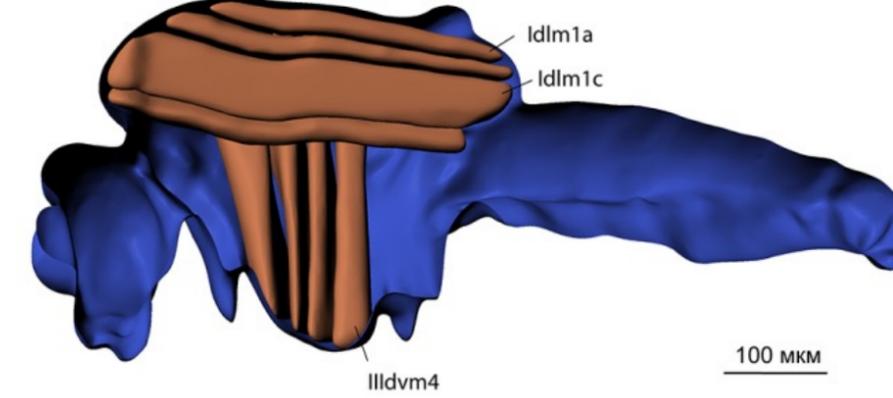


толщина мембраны  
0.73 / 0.85 / 0.98 / 1.12 мкм



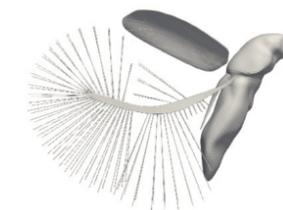
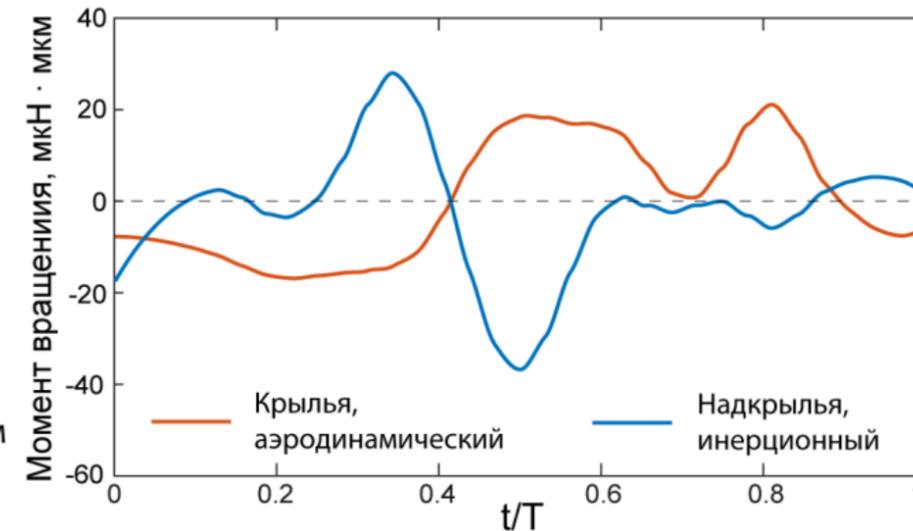
*P. placentis*  
(Ptiliidae)

Полилов 2016

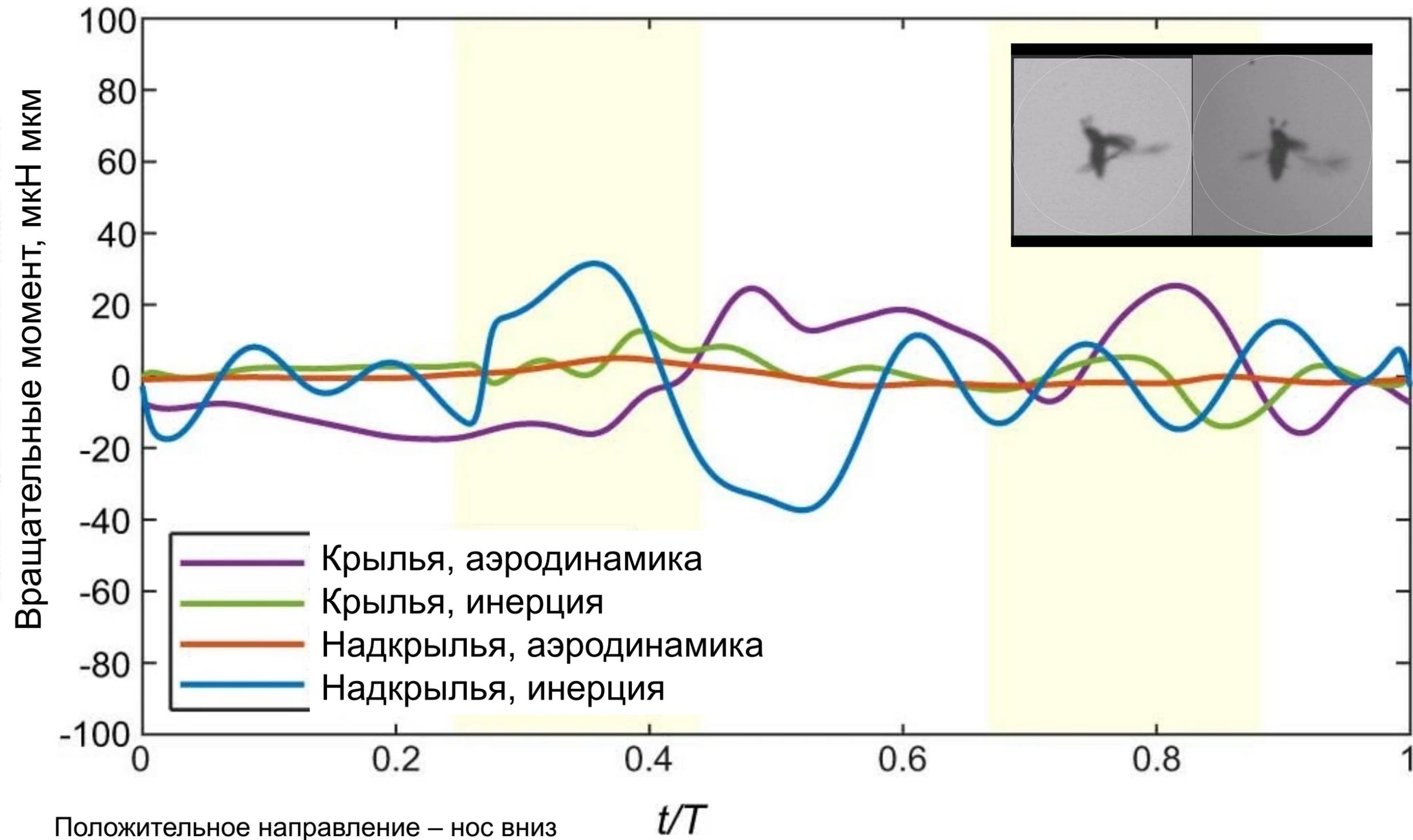


*Corynoneura*  
(Chironomidae)

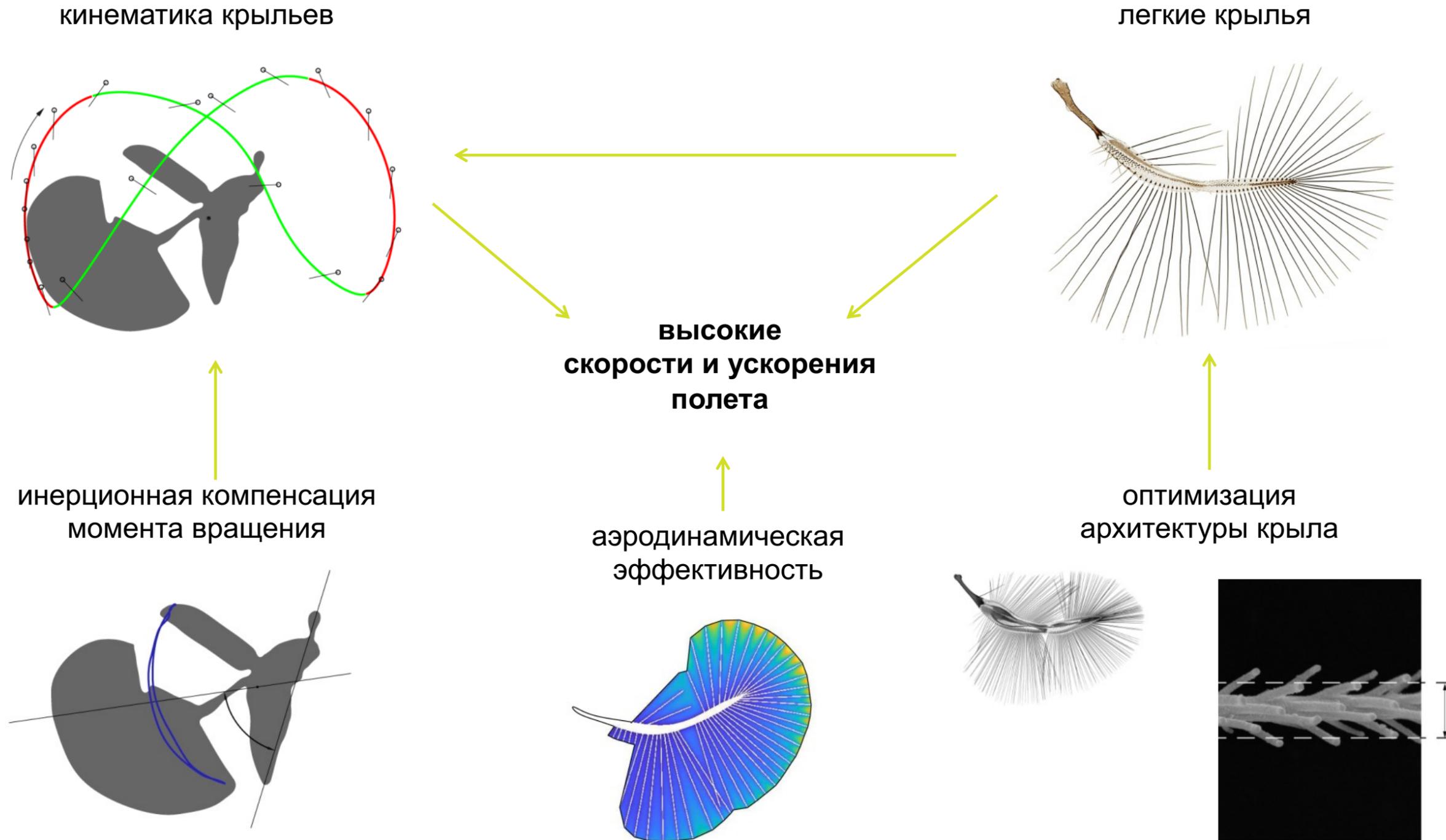
Веко, Полилов 2020



# Вращательное движение тела



# Факторы эффективности полета перокрыльных



- Вычислительные ресурсы Ломоносов-2 (2183) и IDRIS (A0102A01664)
- Гранты РФФИ (19-14-00045), DFG (LE905/16-1, LE905/18-1), JSPS (18K13693, 19H02060)



The image shows a screenshot of a Nature journal article page. At the top, the 'nature' logo is displayed in a bold, lowercase font. Below the logo, there are three navigation links: 'Explore content', 'About the journal', and 'Publish with us', each followed by a downward-pointing chevron. A horizontal line separates the header from the main content. Below the line, the breadcrumb path 'nature > articles > article' is shown. The article title is 'Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles', presented in a large, bold, black font. Above the title, the text 'Article | Open Access | Published: 19 January 2022' is visible. Below the title, the authors are listed: 'Sergey E. Farisenkov', 'Dmitry Kolomenskiy', 'Pyotr N. Petrov', 'Thomas Engels', 'Nadezhda A. Lapina', 'Fritz-Olaf Lehmann', 'Ryo Onishi', 'Hao Liu', and 'Alexey A. Polilov'. Some names have an envelope icon next to them. At the bottom of the screenshot, the citation information 'Nature 602, 96–100 (2022) | Cite this article' is provided.

**Thnx**