

Развитие бессеточных кодов ВВД-2D и ВДД-3D
для численного решения сопряженных задач
нестационарного взаимодействия
упруго связанных тел с вязкой сплошной средой

Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я., Сыроватский Д.А.

НИИ механики МГУ, Москва

28 ноября 2015

Команда



Поддержка проекта

*Разработка ведется при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ^{1 2}*

«Разработка суперкомпьютерных технологий бессеточного моделирования течений вязкой жидкости на основе лагранжевых методов для решения сопряженных задач взаимодействия систем упруго связанных тел с потоками сплошной среды»

Соисполнители:

- НИИ механики МГУ
- ЗАО «Т-Сервисы»
- ООО «Закон Авогадро»

Индустриальный партнер:

- ООО «Далва фильтр»

¹соглашение 14.576.21.0079

²проект RFMEFI57614X0079

Что умеет vvflow

Уравнения Навье-Стокса 2D

Жидкость

- вязкая
- несжимаемая

Тела

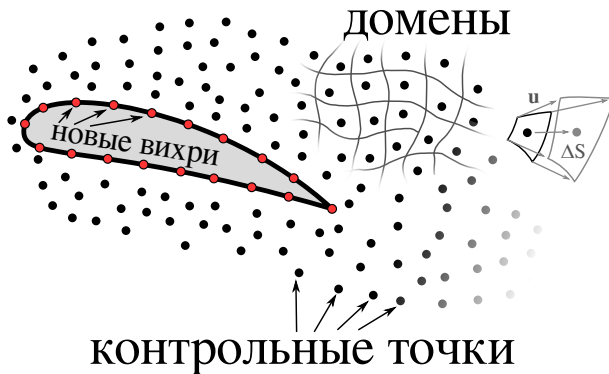
- много
- произвольной формы
- недеформируемые
- связаны друг с другом
- закреплены упруго

Результат

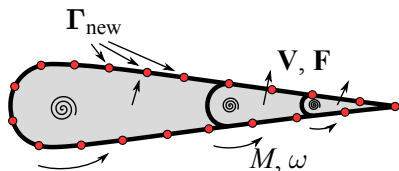
- Картина течения
- Движение тел
- Силы (гидродинамические, реакции опоры)
- Эпюры (давления, трения)

Коротко о методе ВВД

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = \mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla \left(p + \frac{V^2}{2} \right), \nabla V = 0$$
$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\nabla (\mathbf{u} \Omega), \quad \boxed{\mathbf{u} = \mathbf{V} - \nu \frac{\nabla \Omega}{\Omega}} \Rightarrow \int_{\Delta S} \Omega dS = \text{const}$$



Решение сопряженных задач



Неизвестные:

γ_i — циркуляции новых доменов

$\mathbf{F}_{\text{hydro}}, M_{\text{hydro}}$ — Г.-Д. силы

\mathbf{V}, ω — скорости тел

\mathbf{F}_O, M_O — реакции опоры

Система линейных алгебраических уравнений:

Условие прилипания:

$$\mathbf{n}_s (\sum \mathbf{K} \times \Delta \Gamma_s + \sum \mathbf{K} \times \Gamma_{\text{free}} + \sum \mathbf{K} \times 2\omega \Delta \mathbf{l}_s) = \mathbf{V}_s \mathbf{n}_s$$

Выражения гидродинамических сил:

$$\mathbf{F}_{\text{hydro}} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{s=1}^{N_s} [\Delta \Gamma_s \times \mathbf{r}_s] - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{N_s} [\mathbf{e}_z \times \Delta \mathbf{l}_s] \cdot V_{\text{old}}^2$$

$$M_{\text{hydro}} = \frac{1}{2\Delta t} \sum_{s=1}^{N_s} \Delta \Gamma_s \cdot \mathbf{r}_*^2 - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{r}_* \cdot \Delta \mathbf{l}_s) \cdot V_{\text{old}}^2$$

Второй закон Ньютона:

$$\mathbf{F}_{\text{hydro}} + \mathbf{F}_O + \mathbf{F}_{O \text{ child}} = m \dot{\mathbf{V}}$$

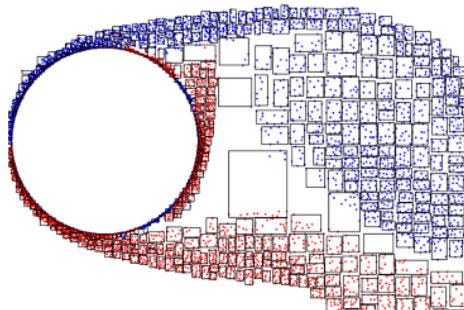
$$M_{\text{hydro}} + M_O + M_{O \text{ child}} + [\Delta \mathbf{R}_O \times \mathbf{F}_{O \text{ child}}] = J \dot{\omega}$$

Кинематика: $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\text{root}} + \omega_{\text{root}} [\mathbf{e}_z \times \Delta \mathbf{R}_O]$

Закон гюка: $M_O = k_\alpha \Delta \alpha$

Вычислительная сложность

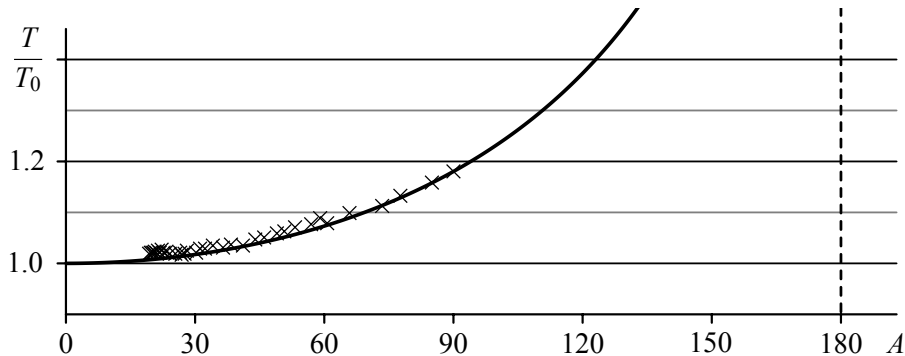
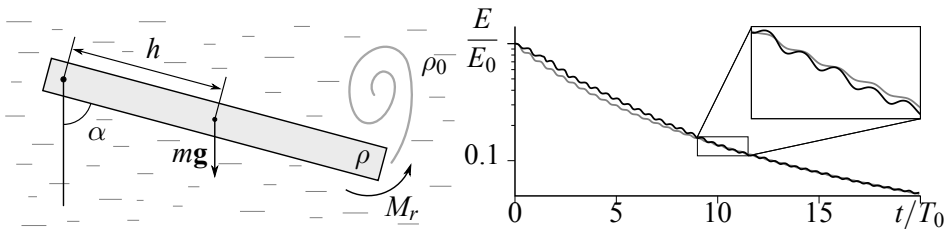
- Вычисление скоростей доменов
 $O(N_v \log N_v)$ (быстрый метод для задачи N тел)
- Заполнение СЛАУ
 $O(N_s \log N_v)$
- Решение СЛАУ
 $O(N_s^3)$ (dgesv или dgemv)



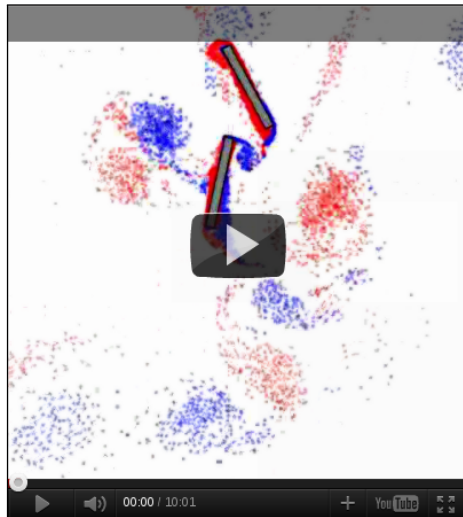
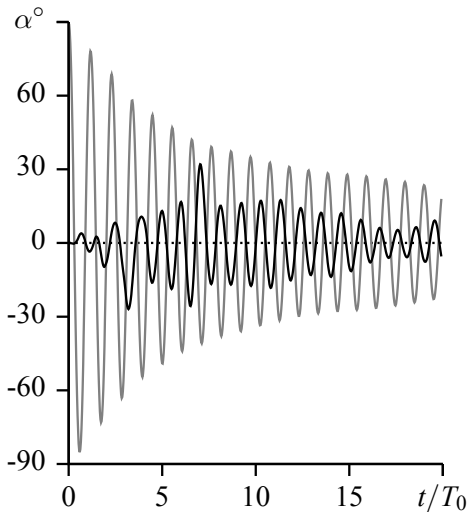
Программное обеспечение

- Основной код на C++
- Немного Python, Gnuplot
- Распараллеливание OpenMP
- Ускорение $\sim 6\times$ (12 ядер)
- Intel compiler collection, MKL
- Только GNU/Linux
- Только консольный интерфейс

Сопряженная задача: физический маятник

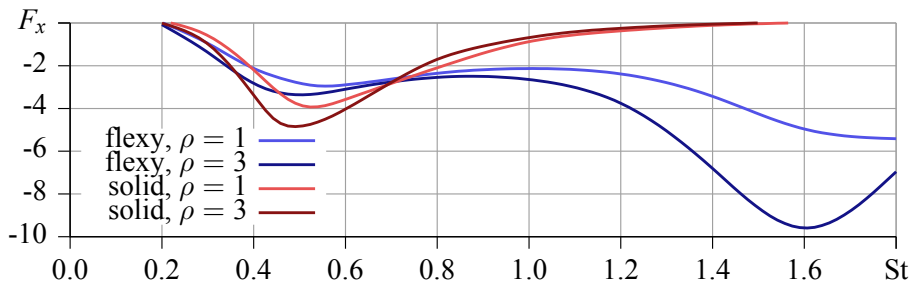
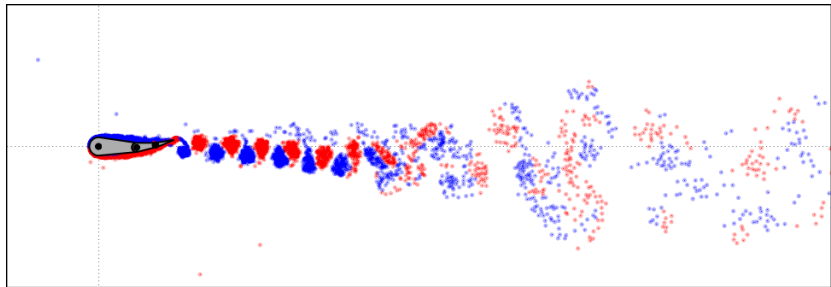


Сопряженная задача: взаимодействие двух маятников



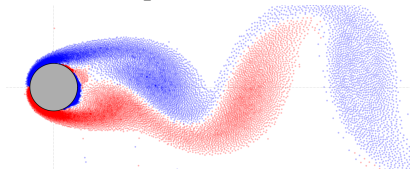
$$\text{Re} = 100, \bar{l} = 1, \bar{m} = 0.1$$

Сопряженная задача: гибкий профиль

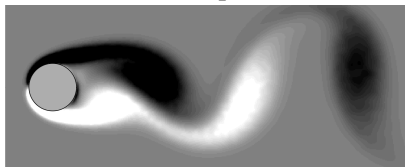


Возможности визуализации течений

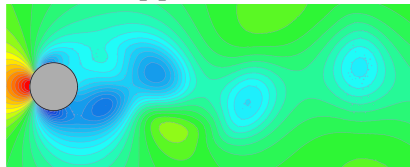
Вихревые домены



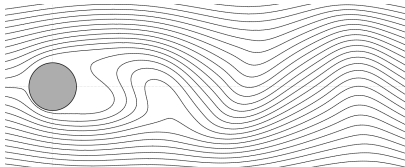
Поле завихренности



Поле коэффициента давления



Линии тока



Визуализация: Линии меченых частиц (streaklines)

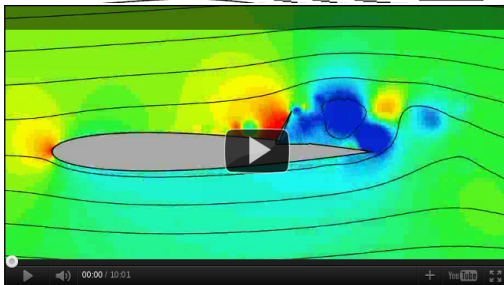
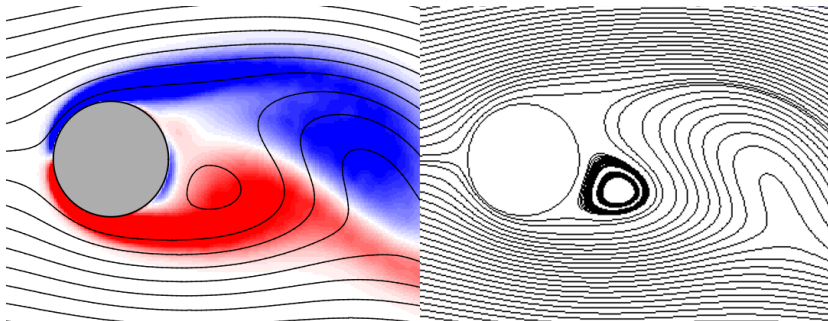
Фото из альбома Ван-Дайка



Эксперимент ВВД



Визуализация: построение линий тока



Планы развития

- Оптимизация кода, эффективность распараллеливания
- Графический интерфейс
- Соударение тел

Что умеет vddflow

Уравнения Навье-Стокса 3D

Жидкость

- вязкая
- несжимаемая

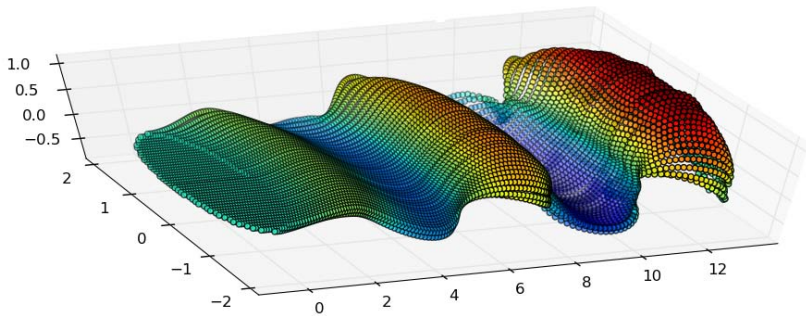
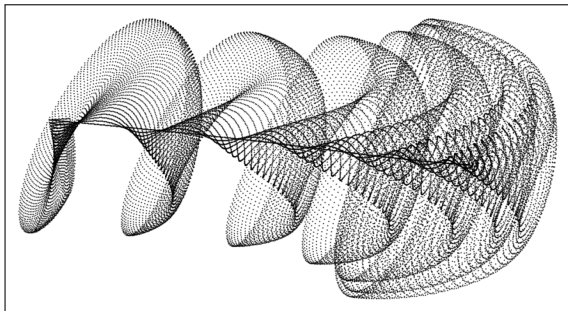
Тела

- одна тонкая пластина
- произвольной формы
- закон движения детерминирован

Результат

- Картина течения
- Гидродинамические силы

Расчеты vddf_{flow}



Спасибо за внимание