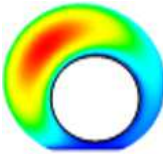




CFD-weekend 2020



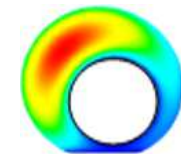
Комплекс программ SigmaFlow: современное состояние, новые задачи

Гаврилов А.А., Дектерёв А.А

**Институт Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе
Красноярский филиал**



История создания кода



МАТОК – 1989г.

2D/3D неравномерные шахматные сетки с блокировкой подобластей
постоянная эффективная турбулентная вязкость
зональный метод теплообмен
метод решения –SMAC

Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Программный комплекс МАТОК по расчету аэродинамики топочных камер энергетических котлов. Сибирский физико-технический журнал. № 6, 1992

AeroChem – 1993г.

2D/3D криволинейные структурированные частично совмещенные одноблочные сетки с блокировкой подобластей
турбулентность - стандартная k- ξ модель, Chen-Kim k- ξ
излучение - P1
реагирование – глобальные реакции + EBU модель
многофазность - лагранжев (частички угля – движение + эмпирическая модель горения)

Каменщиков Л.П., Быков В.И., Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Численное моделирование реагирующих турбулентных течений в трехмерных областях сложной конфигурации. Химическая промышленность, N1, 1995

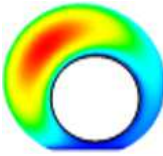
SigmaFlow – 2001

3D, криволинейные структурированные многоблочные сетки, совмещенные сетки, MSST
модель турбулентность, ...

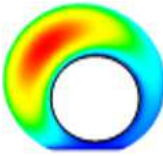
Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов, Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов. Вычислительные технологии, т.8, ч.1, 2003



SigmaFlow - моделируемые процессы



- стационарные и нестационарные течения;
- турбулентность (RANS, PANS, RANS/LES, LES);
- неньютоновские жидкости;
- процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
- химические реакции в потоке , горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- конвективный, радиационный теплообмен, теплопроводность;
- движение дисперсной фазы в потоке (Лагранж, Эйлер);
- процессы с фазовыми переходами (кавитация, кристаллизация);
- течения со свободной поверхностью (VOF);
- течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами

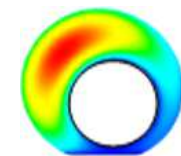


Численный метод

- Метод контрольного объема для неструктурированной сетки;
- SIMPLE подобный метод для связи полей давления и скорости;
- Совмещенные сетки с монотонизацией Рхи–Чоу;
- Нестационарные слагаемые – неявный трёхслойный метод, метод Кранка–Николсона
- Аппроксимация конвективных потоков – CDS, High-order CDS, QUICK, family of TVD schemes ...;
- Решение системы алгебраических уравнений:
стабилизированный метод бисопряжённых градиентов (BiCGStab),
алгебраический многосеточный метод (amgcl, Демидов Д.)
- Распараллеливание – разбиение на подобласти (MeTiS), MPI

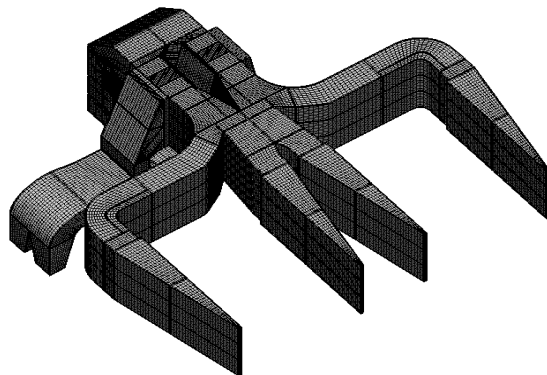
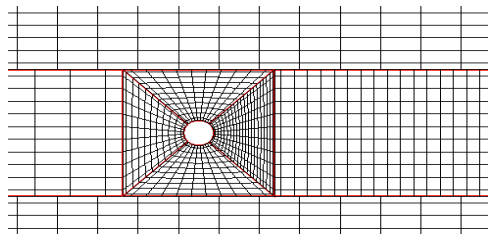


Сетки

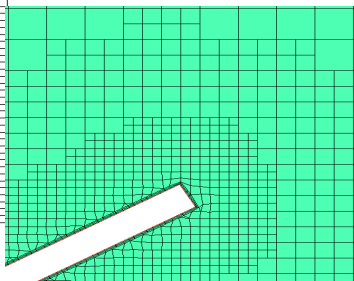
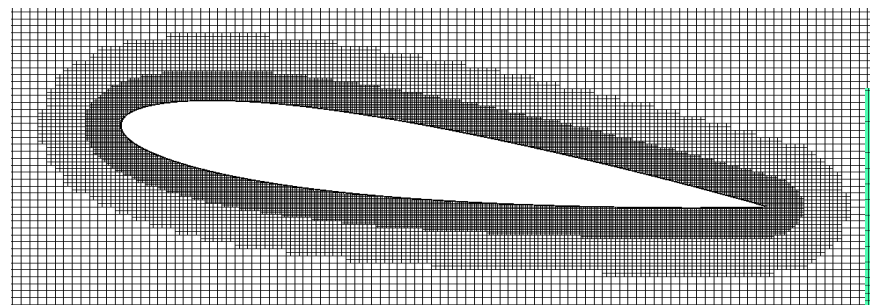


Собственные генераторы сеток

Многоблочная структурированная сетка

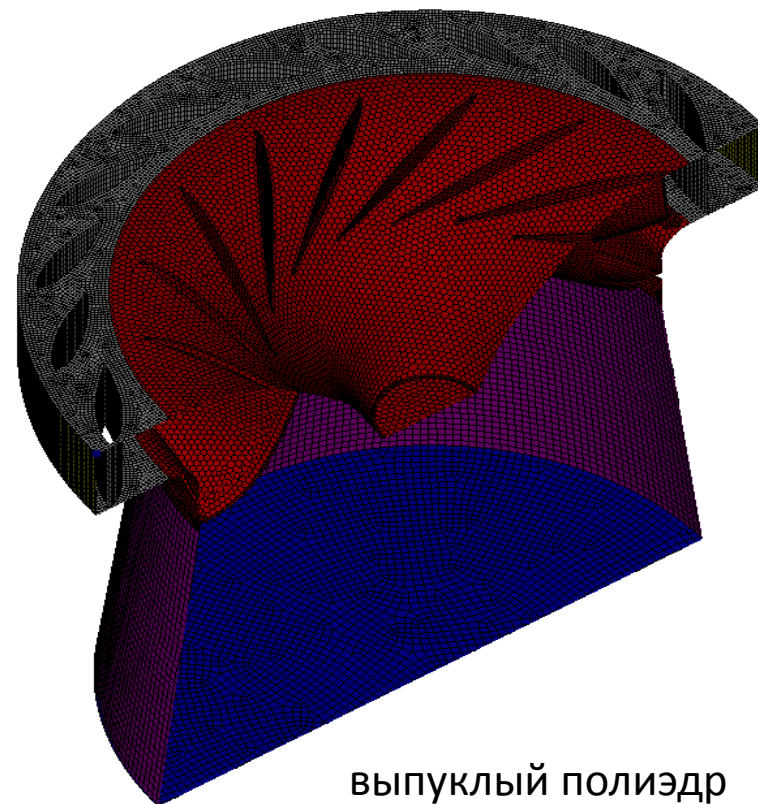


Окто-сетка



Импорт (Fluent) и объединение сеток

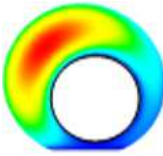
Гибридная сетка



выпуклый полиэдр



Программные продукты



SigmaFlow – неkomмерческий универсальный CFD программный комплекс (широкий набор физических моделей, пре-постпроцессинг)

SigmaFlame – специализированная программа для моделирования топочных камер энергетических котлов

SigmaFire – специализированная программа для моделирования пожаров в зданиях и сооружениях

TubeFlow – специализированная программа для расчета течения бурового раствора в кольцевых зазорах (разработка для **Бэйкер Хьюз**)

программа для расчета аэродинамики и движения капель при струйной печати (**HP**)

программа для расчета устройств по дожиганию электролизных газов (**РусАл**)

программа для расчета роторных печей для плавки алюминия (**Мособлпромонтаж**)

программа для расчета гидродинамики в проточном тракте ГЭС (**Силовые машины**)

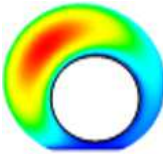
программа для расчета процессов в реакторе силицирования УМ(**УНИИКМ**)

Версия **SigmaFlow** для расчета на **GPU**

Программный модуль **NetFlow** (сетевое моделирование) для совместного расчета с **SigmaFlow**



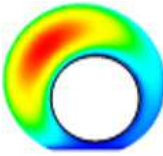
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения **дисперсных сред**
- Развитие моделей течения **неньютоновских жидкостей**
- Специализированная версия для расчета **ЛА с циклическими движителями**
- Специализированная версия для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- Свободно распространяемая **учебная версия SigmaFlow**



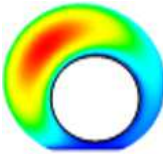
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения дисперсных сред
- Развитие моделей течения неньютоновских жидкостей
- Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими движителями
- Специализированная версия для моделирования аэродинамики городской застройки и распространения экологически вредных выбросов
- Свободно распространяемая учебная версия SigmaFlow



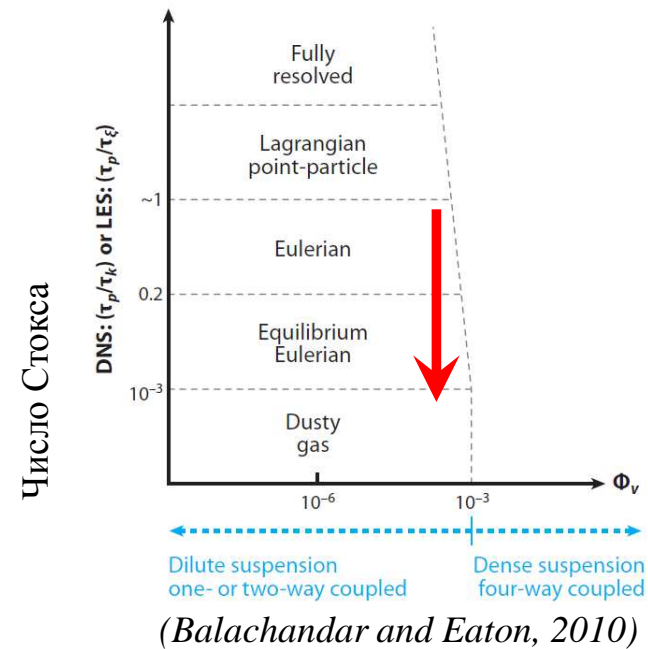
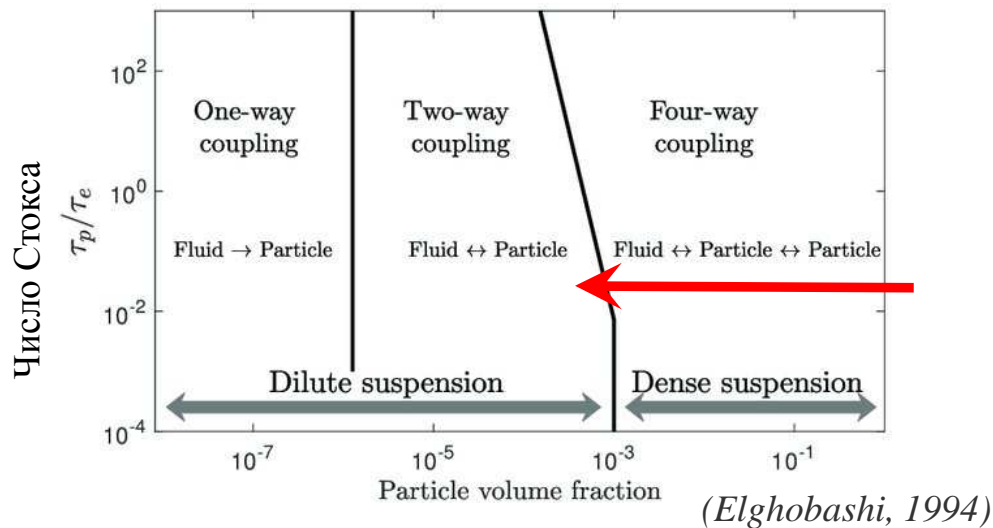
LES для течений суспензий



Проблема: отсутствие замыкающих соотношений (моделей) для статистического описания турбулентных течений **неньютоновских жидкостей с частицами** (*Рассматриваются неньютоновские псевдопластичные и вязкопластичные жидкости с эффективной вязкостью уменьшающейся при увеличении скорости сдвига*)

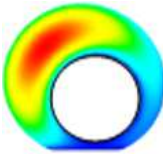
Разработка метода крупных вихрей (LES) с континуальным представлением дисперсной фазы для течений жидкость-частицы с произвольной концентрацией частиц.

Требования: 1) реология плотной суспензии, 2) высокое число Стокса ≤ 1 , 3) $\rho_p/\rho_f \sim 1$





Математическая модель. Модель смеси



Расширение модели с равновесной скоростью межфазного скольжения:

Уравнения двухжидкостной двухскоростной модели (жидкость-частицы) переформулируются в уравнения для смеси в целом и для твердой фазы. Модель включает отфильтрованные уравнения неразрывности и количества движения, сформулированных для смеси в целом (Shotorban and Balachandar, 2007; Zaichik et al., 2009)

Модель смеси: $\rho = \rho_f (1 - \phi) + \rho_p \phi$ $\rho \mathbf{u} = \rho_f (1 - \phi) \mathbf{u}_f + \rho_p \phi \mathbf{u}_p$

ϕ - объёмная концентрация твёрдых частиц

f - жидкость, p - частицы

d_p - диаметр частиц

τ_p - время релаксации частицы в стеснённом потоке

Смесь в целом

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \hat{\mathbf{u}}) = 0$$

реология плотной суспензии

$$\rho \frac{d\hat{\mathbf{u}}}{dt} = -\nabla \hat{p} + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\tau}}_v + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{sgs}$$

подсеточные тензор напряжений и поток частиц

Частицы

$$\frac{\partial (\rho_p \hat{\phi})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \hat{\mathbf{u}}_p \hat{\phi}) - \nabla \cdot \mathbf{J}_{sgs} = 0$$

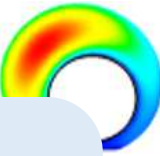
Уравнения переноса концентрации частиц и относительной скорости

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{u}}_r = \frac{a_1}{\tau_p} (\hat{\mathbf{u}}_r^0 - \hat{\mathbf{u}}_r)$$

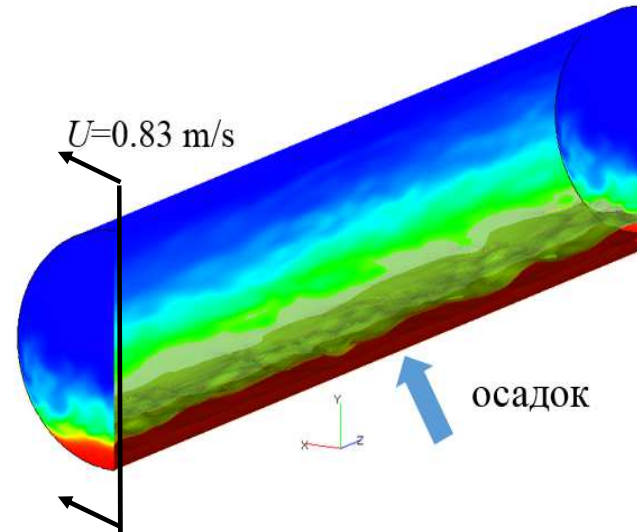
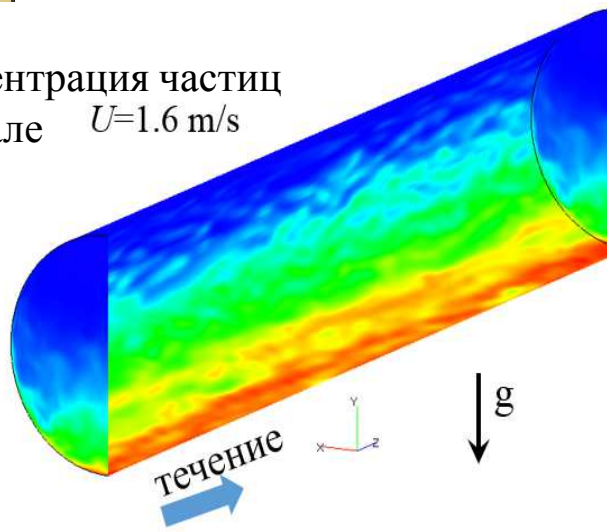
равновесная относительная скорость



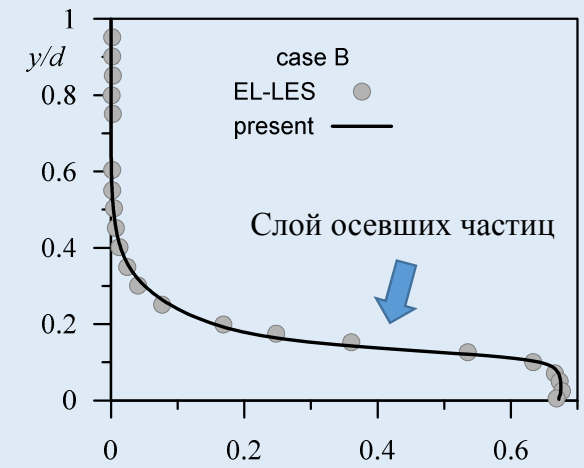
Течение суспензии с тяжёлыми частицами в трубе



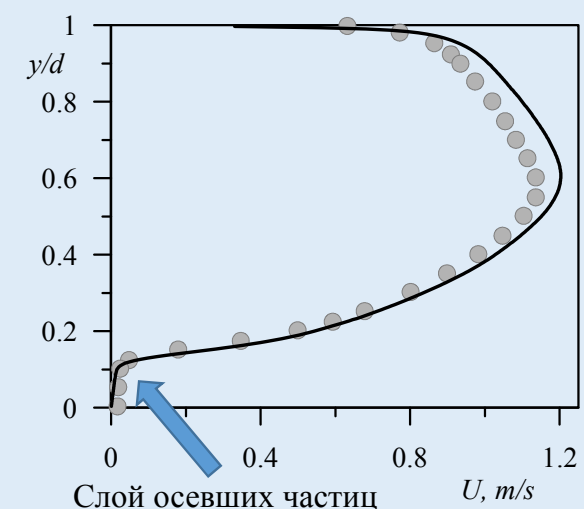
Концентрация частиц
в канале $U=1.6$ m/s



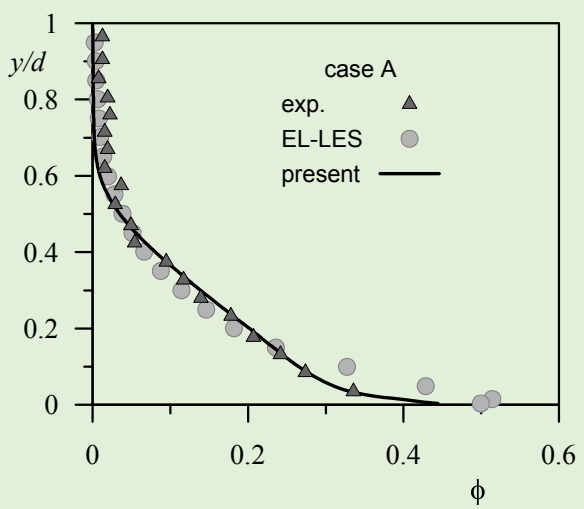
объемная концентрация частиц



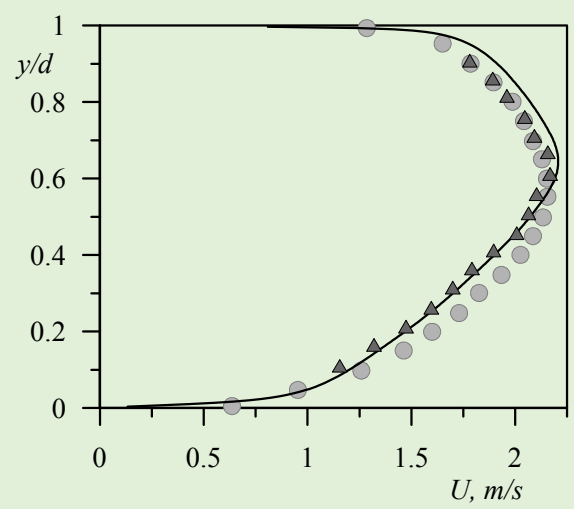
средняя скорость жидкости



объемная концентрация частиц



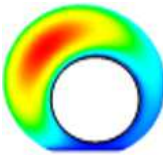
средняя скорость жидкости





Течение суспензии с тяжёлыми частицами в трубе

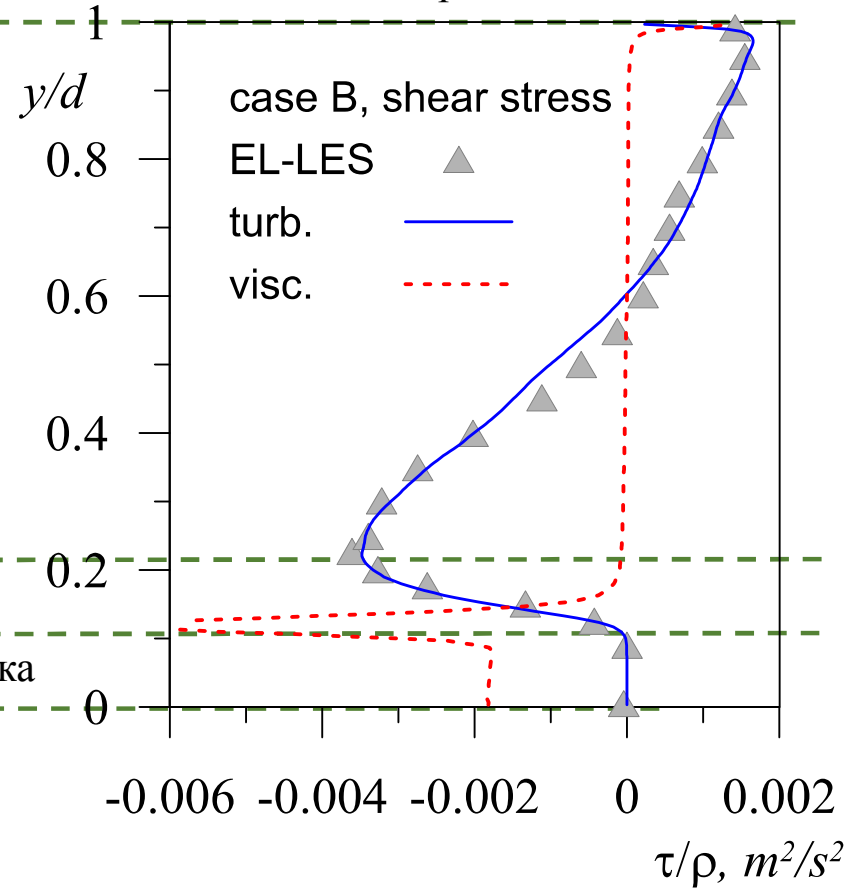
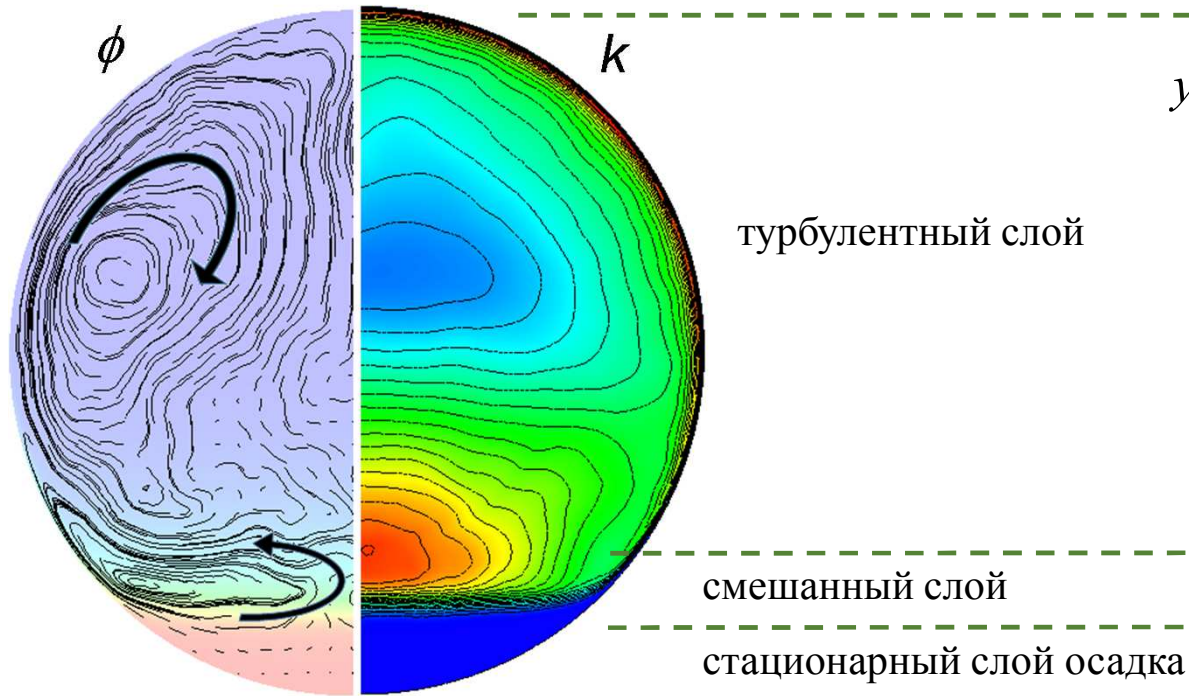
Вторичные течения в поперечном сечении и слоистая структура течения



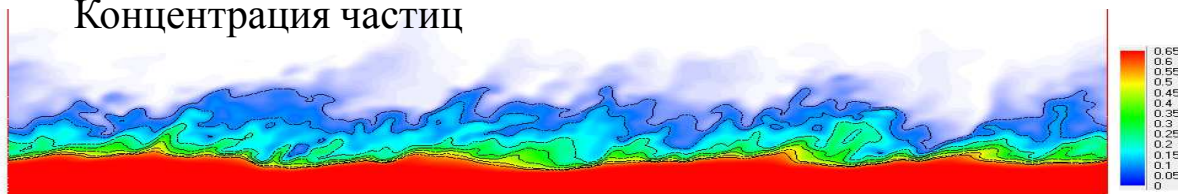
Case B

кинетическая энергия

Сдвиговые напряжения смеси

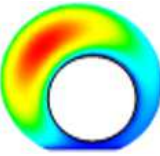


Концентрация частиц

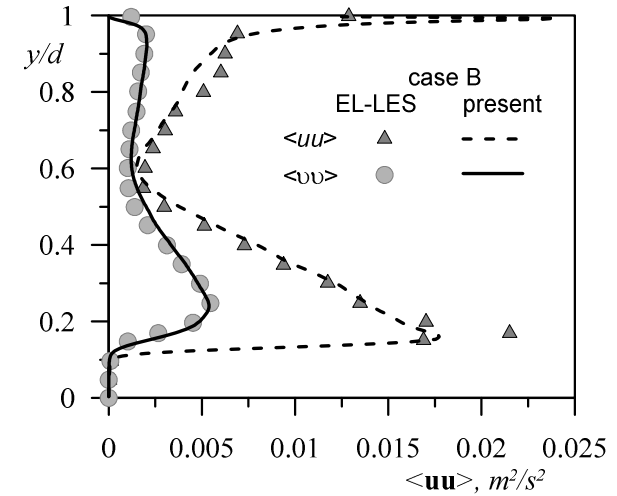
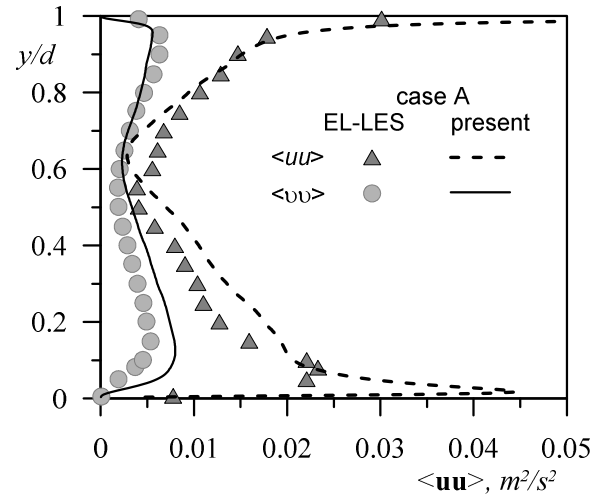
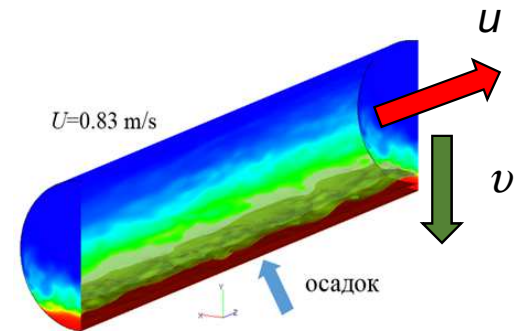




Течение суспензии с тяжёлыми частицами в трубе

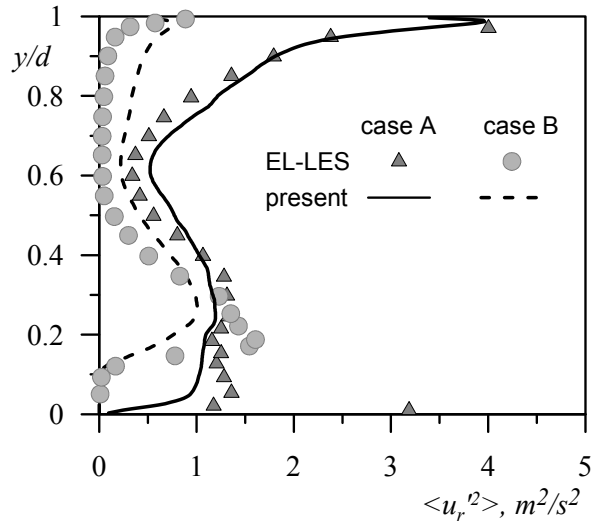


Компоненты тензора турбулентных напряжений жидкости



Пульсации относительной скорости

$$\langle u_r'^2 \rangle = \langle (\mathbf{u}'_p - \mathbf{u}'_f)^2 \rangle$$

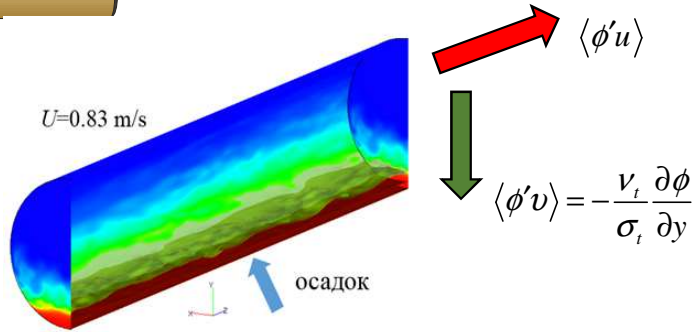
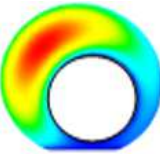


$$S_{p,d} = -\frac{\rho_p \phi}{\tau_p} \langle u_r'^2 \rangle$$

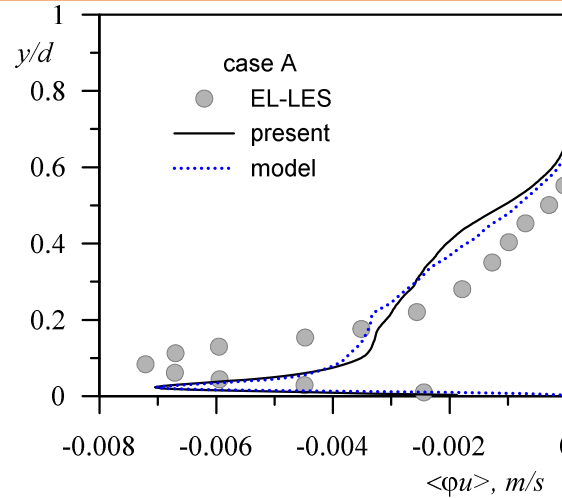
диссипации турбулентности из-за частичного вовлечения частиц в турбулентное движение



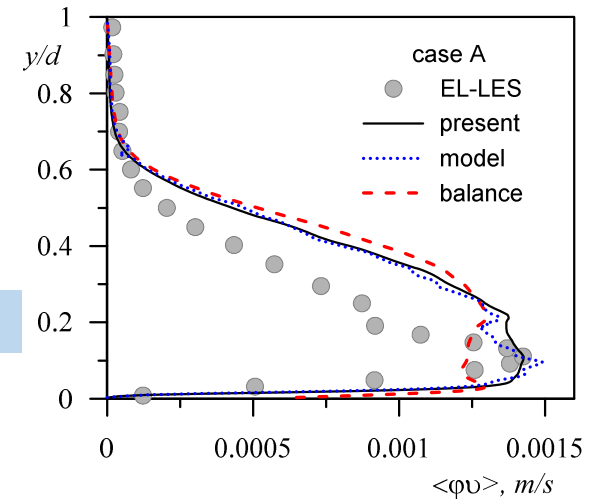
Замыкания для корреляций с концентрацией частиц



горизонтальный турбулентный поток



вертикальный турбулентный поток



1. Замыкающее соотношения для турбулентного потока частиц:

$$\langle \phi'u_i \rangle = -\frac{C_\mu}{\sigma_t} T_t \left(\langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \xi \langle \phi'u_j \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

2. Модель для пульсаций концентрации частиц

$$\langle \phi'^2 \rangle = -C_{\phi 2} T_t \langle \phi'v \rangle \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

Константы замыкания:

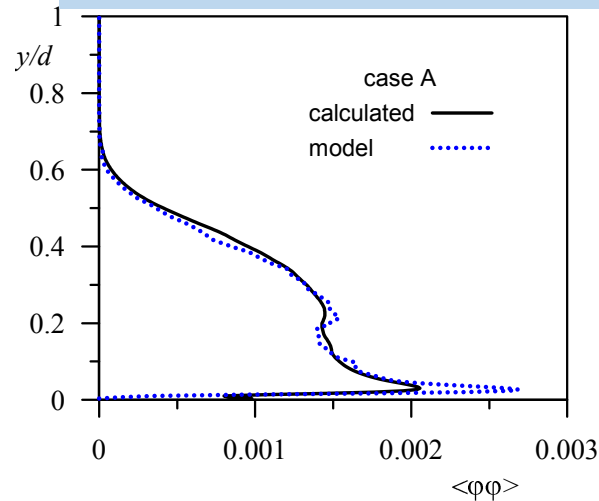
$$C_\mu = 0.22$$

$$\sigma_t = 0.9 - 0.95$$

$$\xi = 2.5 - 3.0$$

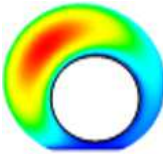
$$C_{\phi 2} = 1.25 - 1.45$$

пульсаций концентрации частиц





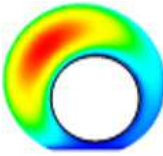
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения дисперсных сред
- Развитие моделей течения неньютоновских жидкостей
- Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими движителями
- Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов
- Свободно распространяемая учебная версия



Моделирование течений эласто-вязко-пластических жидкостей



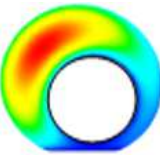
There are several key features of viscoelastic fluids:

- stresses advection, stresses in depend on the flow history;
- stresses anisotropy, normal stress differences;
- elongational viscosity, strain-hardening in uniaxial extension;
- turbulence suppression (as a consequence of previous features).

A proper mathematical model should be effective in reproducing a shear-thinning behavior of the viscosity and normal-stress coefficients as well as a reasonable description of the elongational viscosity.



Mathematical model for elastoviscoplastic fluid



The liquid flow is governed by the continuity and momentum equations for incompressible fluid:

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

$$\boldsymbol{\tau}_s = 2\eta_s \mathbf{D} \quad \mathbf{D} = 1/2(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p$$

\mathbf{D} is the tensor of the deformation rate
 η_s is the solvent viscosity.

The extension of the **Herschel–Bulkley** modified model by **Saramito** (2007, 2009) can be expressed with a generic transport equation for the viscoelastic stress tensor:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\tau}_p + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{\tau}_p}_{\text{convection}} = \underbrace{(\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_p \cdot \mathbf{L})}_{\text{deformation}} + G \left[\underbrace{2\mathbf{D}}_{\text{source}} - \underbrace{\frac{1}{\eta_p} f(\boldsymbol{\tau}_p) \boldsymbol{\tau}_p}_{\text{relaxation}} \right]$$

$$\mathbf{L} = \nabla \mathbf{u}^T - \xi \mathbf{D}$$

$$\frac{1}{\eta_p} = \max \left(0, \frac{|\boldsymbol{\tau}| - \tau_0}{k_v |\boldsymbol{\tau}|^n} \right)^{1/n}$$

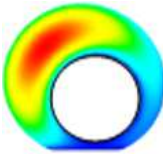
Rheological measurements

Viscoelastic properties: G is the shear modulus of elasticity, η_p is the effective polymeric viscosity, λ is the relaxation time $\lambda = \eta_p / G$

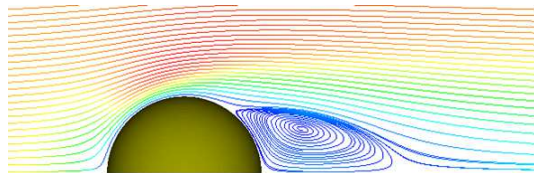
Herschel–Bulkley rheology: n is a power-law index, k_v is a the consistency parameter, τ_0 is a yield stress



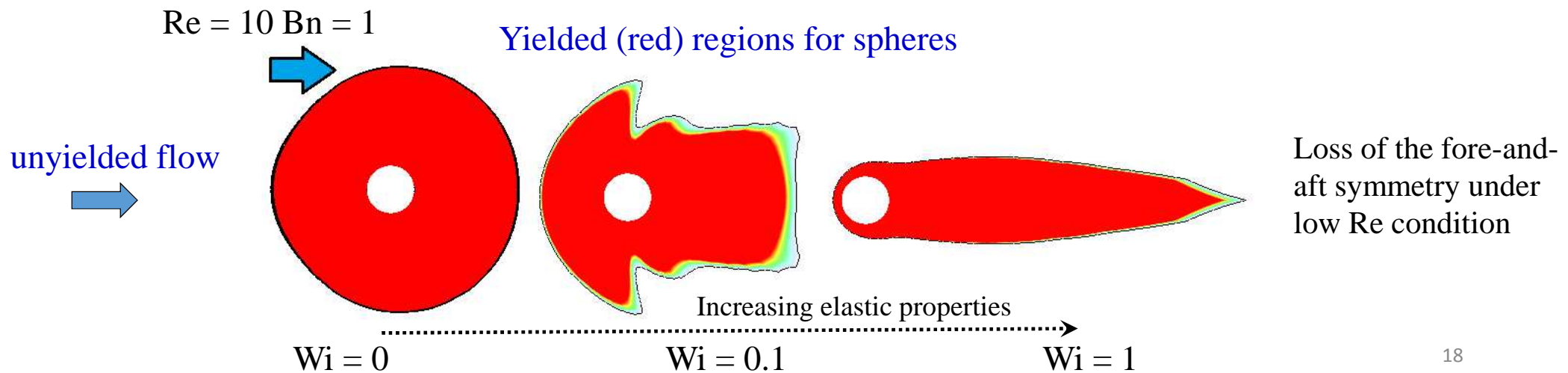
The effects of elasticity on the motion of a single spherical particle in yield-stress fluids



A single spherical particle translates through an incompressible material which behaves as a perfect elastic solid under small stresses, but flows like a viscoelastic liquid, beyond a critical stress, also known as the yield stress of the material. These kinds of materials have recently been characterized as elastoviscoplastic (EVP). The elongational viscosity is always well defined and the shear viscosity shows a **shear thinning behavior**.

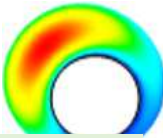


| | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------|
| Reynolds number | $\mathbf{Re} = \rho UH/\eta_0$ | 0.1, 1 |
| Bingham number | $\mathbf{Bn} = \tau_0/(\eta_0 U/h)$ | 0, 0.1, 1 |
| Weissenberg number | $\mathbf{Wi} = \lambda U/H$ | 0 ÷ 10 |
| Power-law index | n | 1.0, 0.4 |



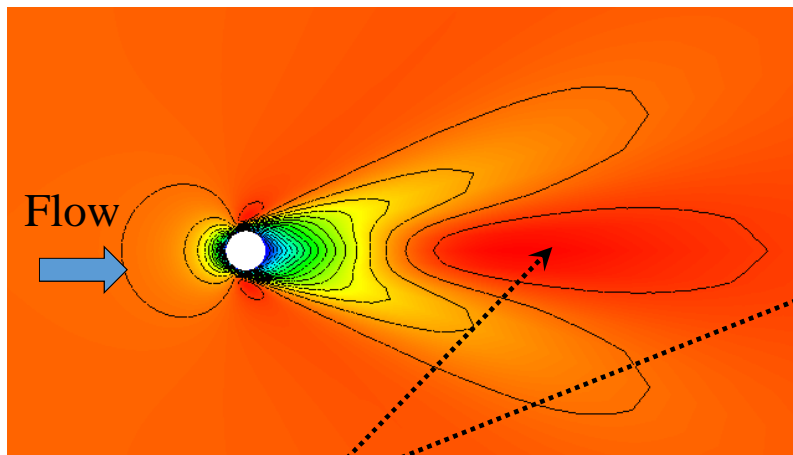


Spherical particle in elastoviscoplastic fluids

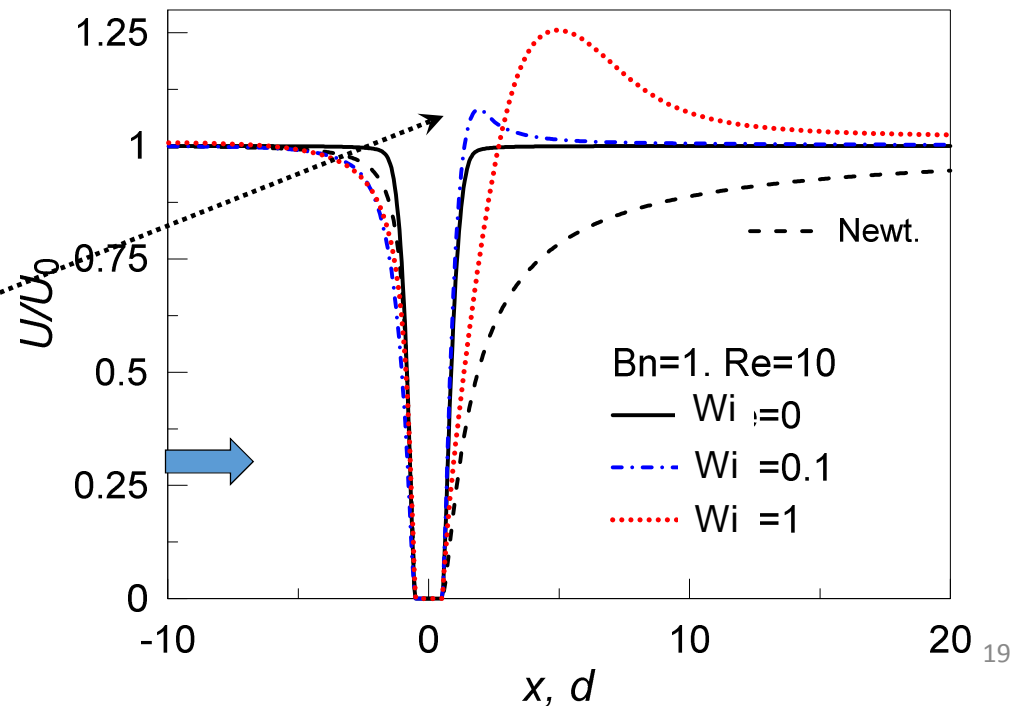


“When, in addition to viscoelasticity, the fluid also exhibits a shear-thinning viscosity, a negative wake may appear downstream from the sphere : The flow moves in a direction opposite to that of the sphere”, Zenit and Feng, Annu. Rev. Fluid Mech. 2018. 50:505–34.

Simulation have revealed phenomena typically associated with elasticity, i.e. the negative wake or the loss of the fore-and-aft symmetry under creeping flow conditions ($Re < 1$).



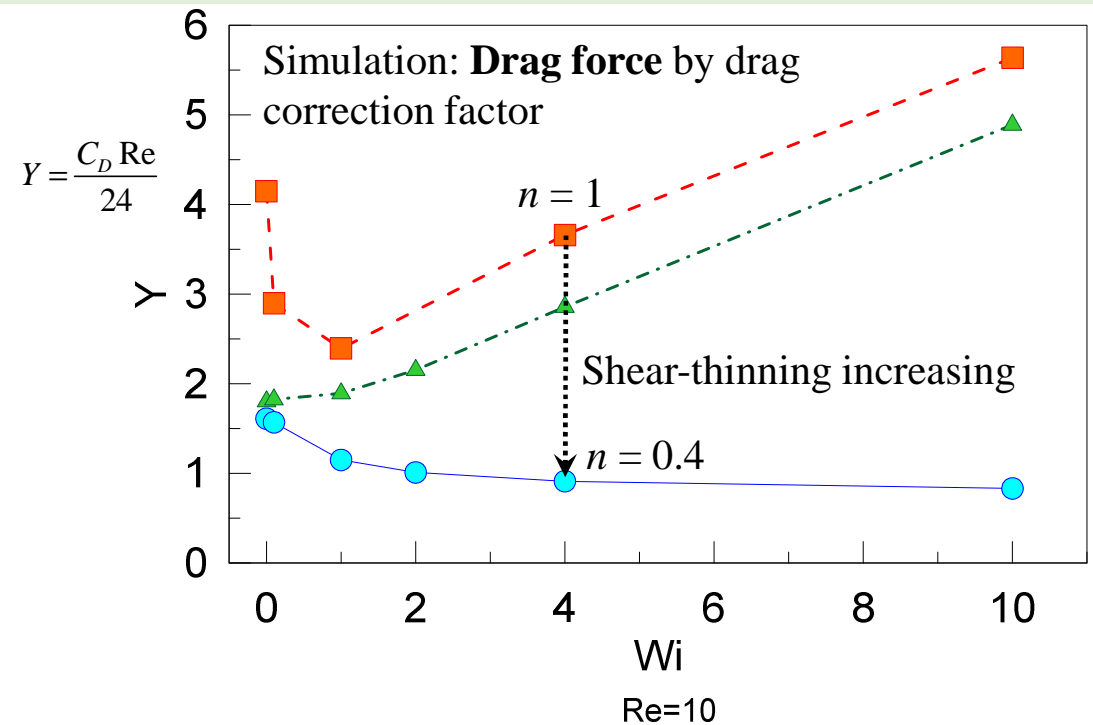
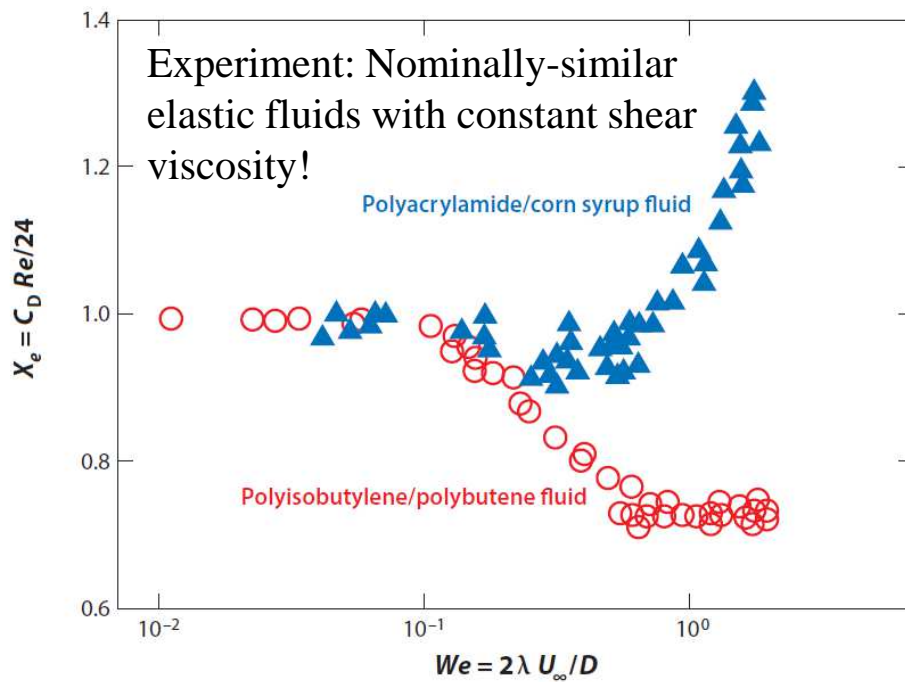
Negative wake





Drag force of spherical particle in elastoviscoplastic fluids

Drag force dependence on rheological parameters demonstrates complex behavior. The settling velocity of particles can decrease with the increasing fluid elasticity. Shear-thinning effects ($n < 1$) are observed to reduce the drag for particles settling in unbounded viscoelastic fluids.

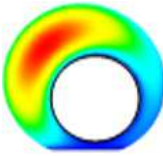


Open red circles represent a polyisobutylene/polybutene Boger fluid and solid blue triangles represent a polyacrylamide/corn syrup Boger fluid (from Zenit and Feng, 2018)

- ▲--- viscoelastic (Oldroyd), $n=1$, $Bn=0$
- elasto-viscoplastic, $n=1$, $Bn=1$
- elasto-pseudoplastic, $n=0.4$, $Bn=0$



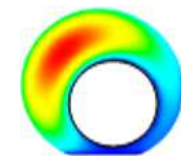
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения дисперсных сред
- Развитие моделей течения неньютоновских жидкостей
- **Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими движителями**
- Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов
- Свободно распространяемая учебная версия

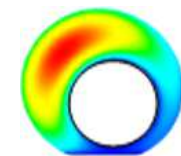


Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями

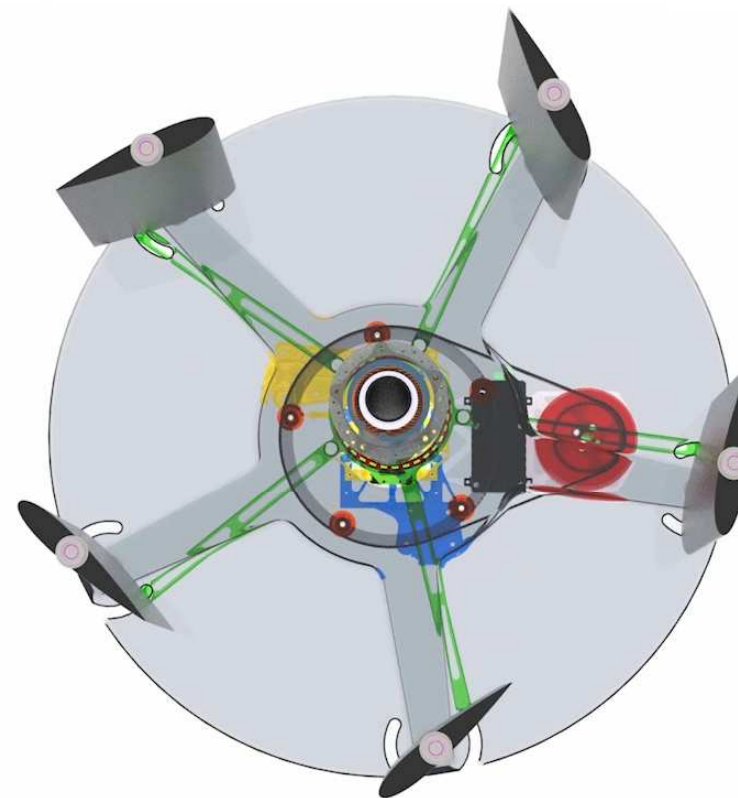




Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями

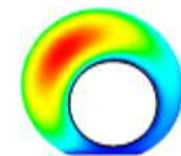


Тяга двигателя создается изменением угла установки лопастей по закону, приводящему к созданию лопастью аэродинамической силы в процессе его оборота, такому, что векторная сумма аэродинамической силы за весь оборот не равна нулю.

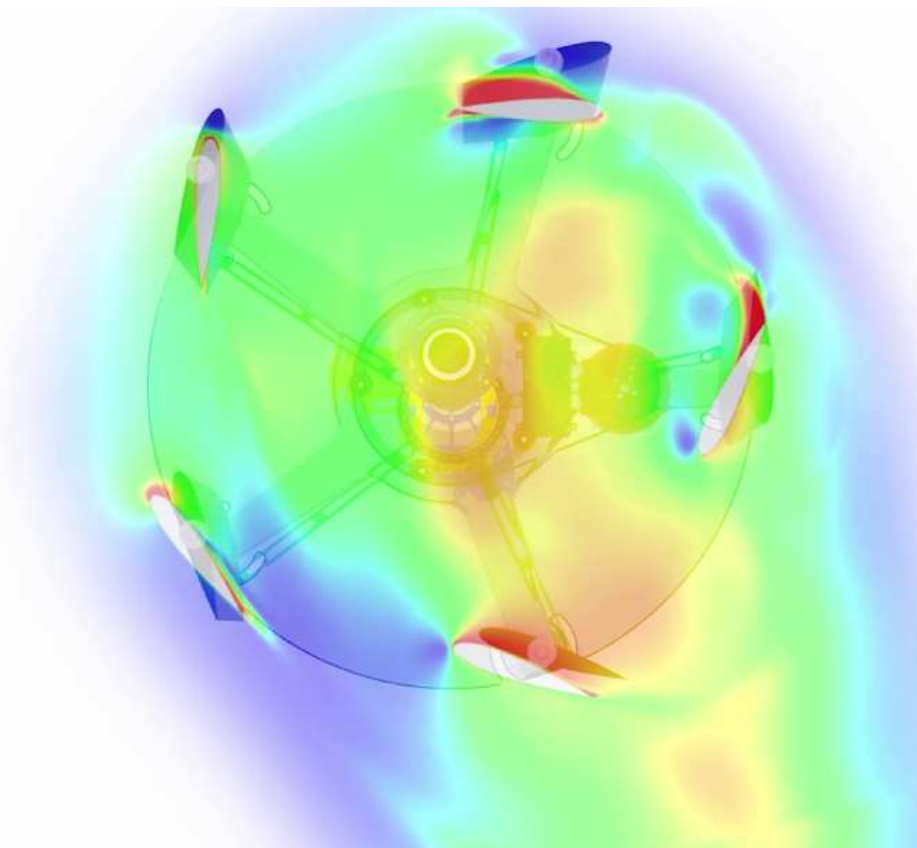




Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями

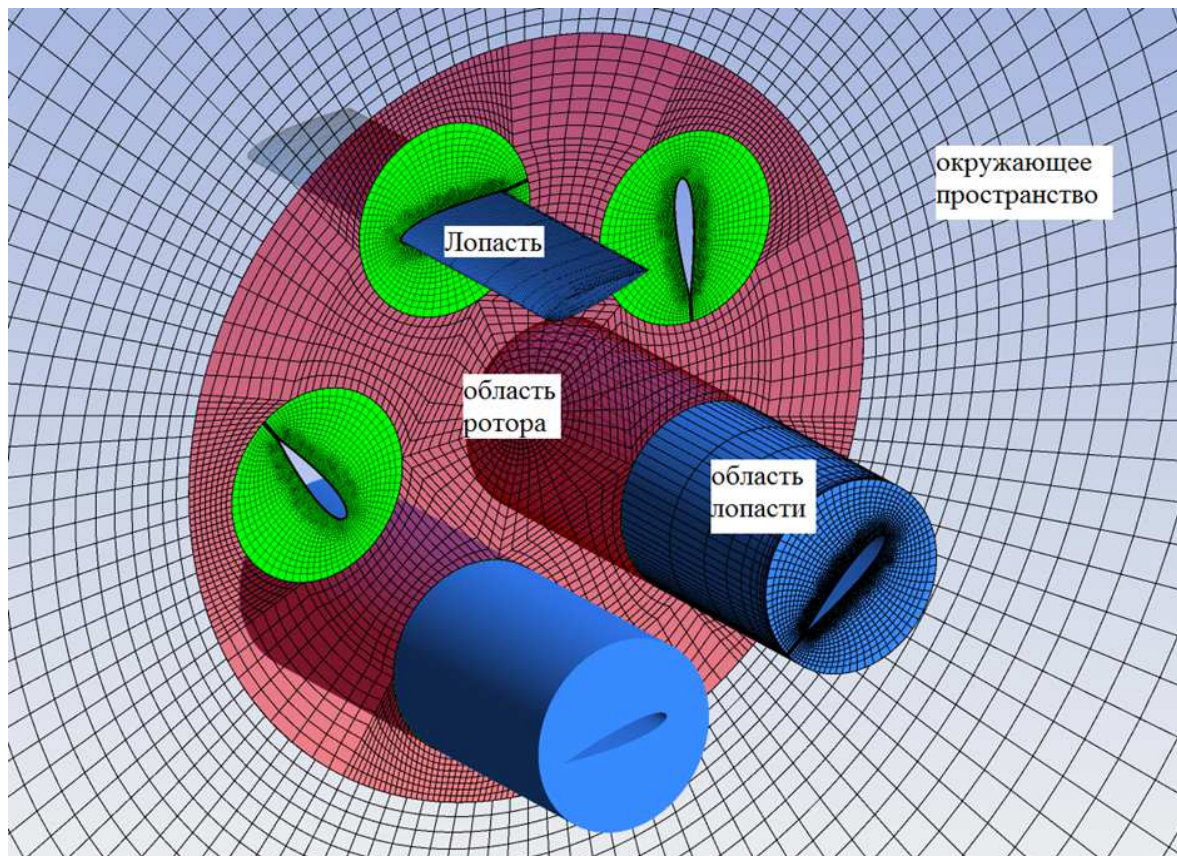
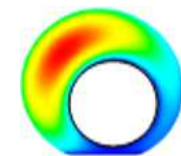


Тяга двигателя создается изменением угла установки лопастей по закону, приводящему к созданию лопастью аэродинамической силы в процессе его оборота, такому, что векторная сумма аэродинамической силы за весь оборот не равна нулю.



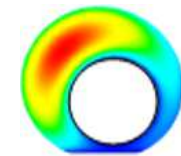


Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими движителями

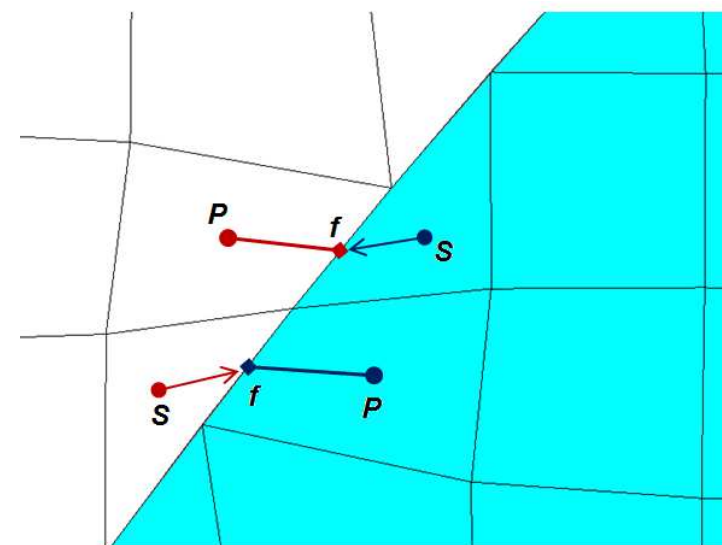
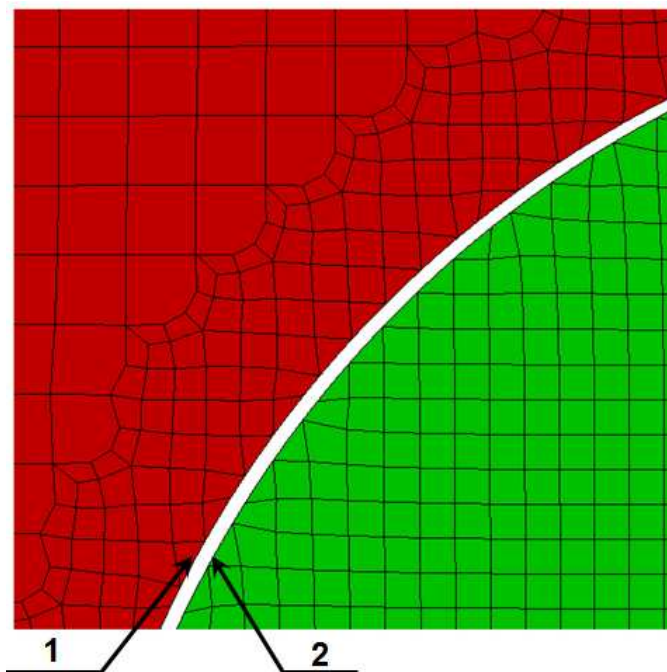
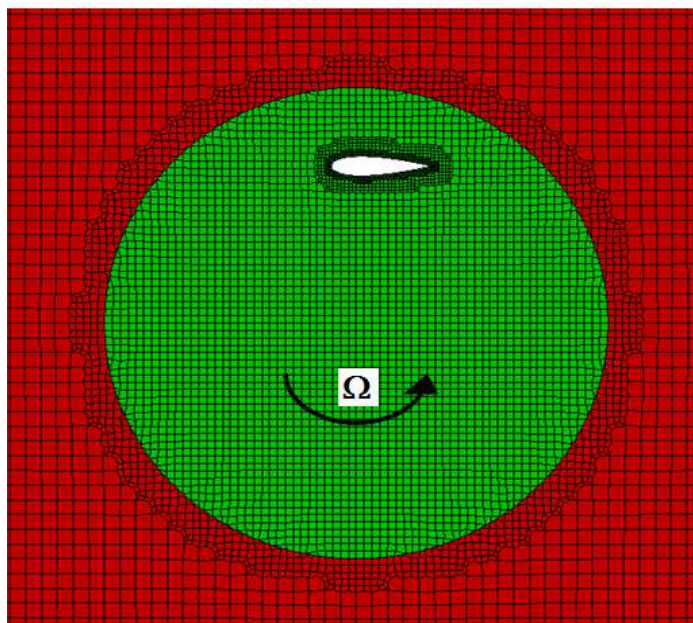




Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями



В программном комплексе SigmaFlow реализован метод скользящих сеток, позволяющий проводить моделирование систем статор-ротор.



Конечно-объемная сетка с вращающейся (зеленый цвет) и покоящейся (красный цвет) подобластями. Цифрами отмечены контактные поверхности подобластей.

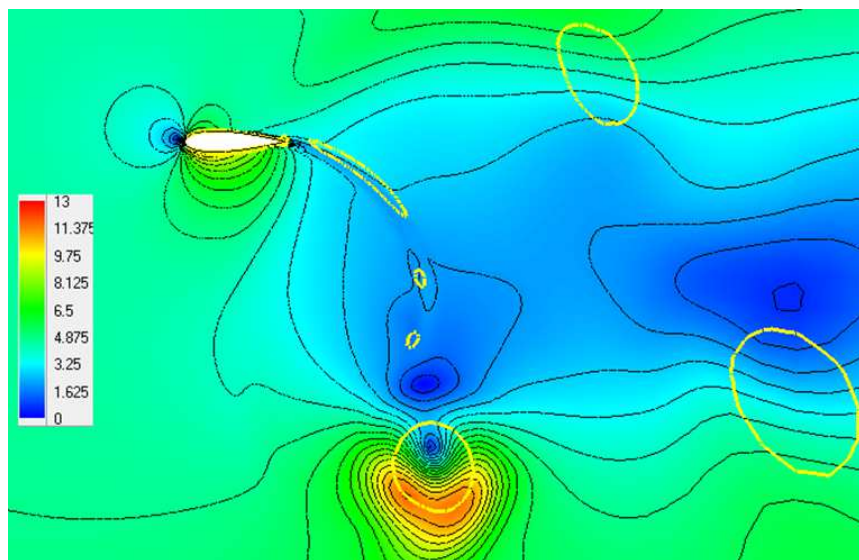
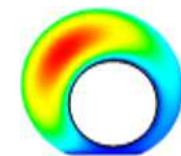
$$\phi_f = (\phi_p + (\nabla\phi)_p \cdot \Delta\mathbf{r})(1 - \lambda_f) + (\phi_s + (\nabla\phi)_s \cdot \Delta\mathbf{r})\lambda_f$$

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_f - (\mathbf{r}_p(1 - \lambda_f) + \mathbf{r}_s\lambda_f)$$

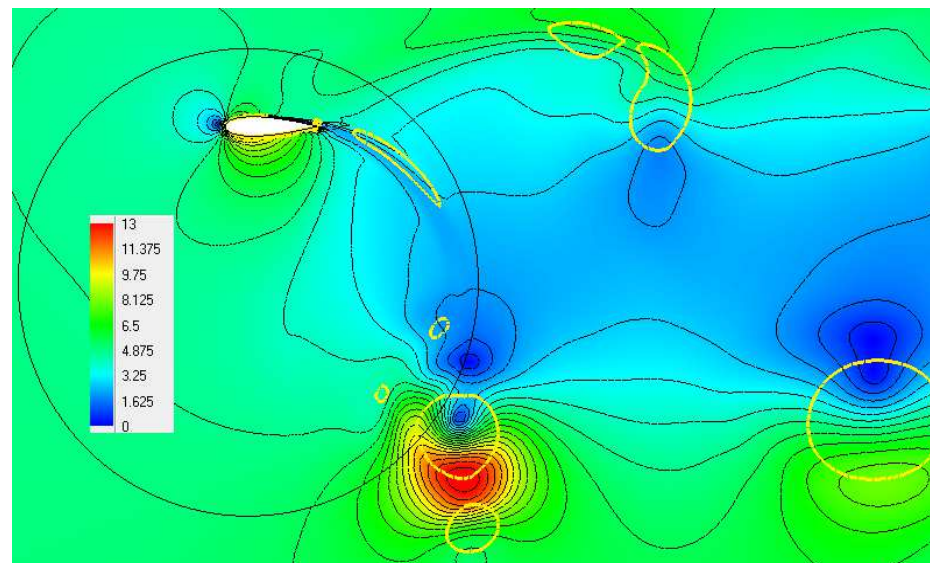
$$\lambda_f = \frac{|\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_p|}{|\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_p| + |\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_s|}$$



Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями



вращающаяся система координат

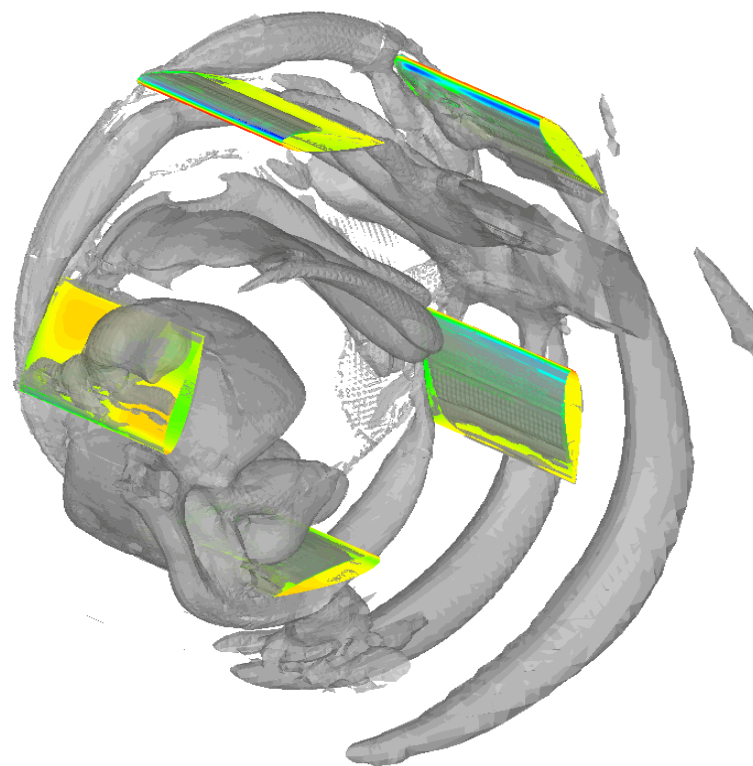
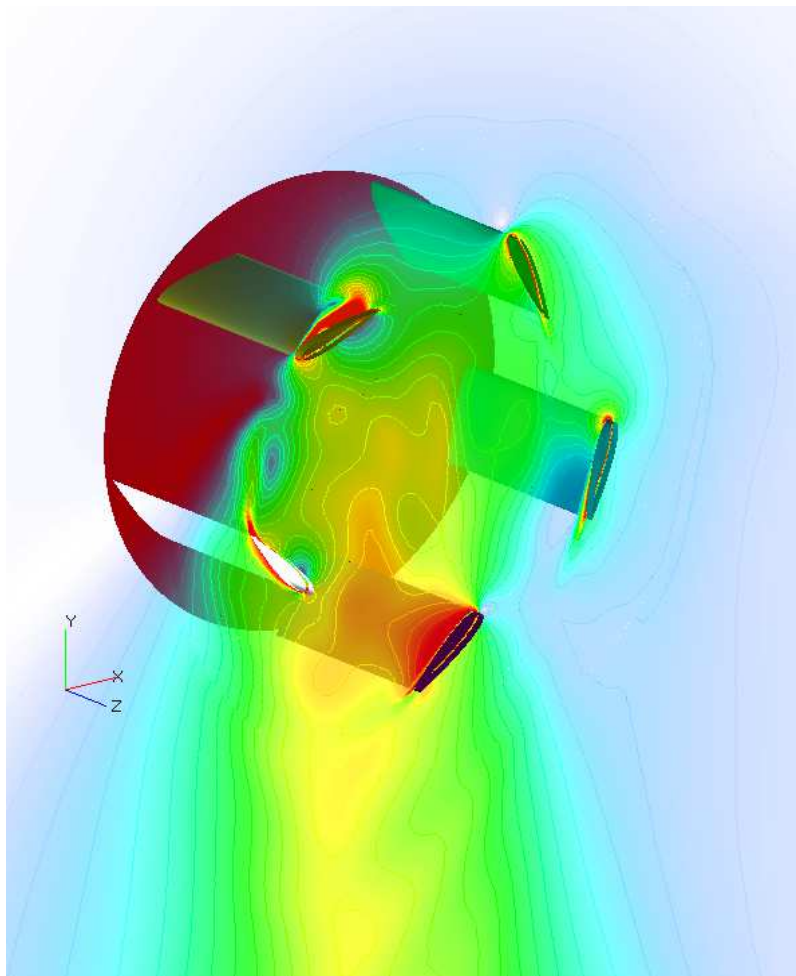
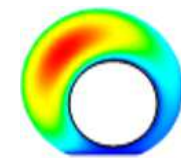


скользящие сетки

Мгновенное распределение модуля скорости.
Желтые линии ограничивают области с вихревым движением.

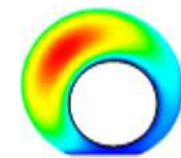


Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями

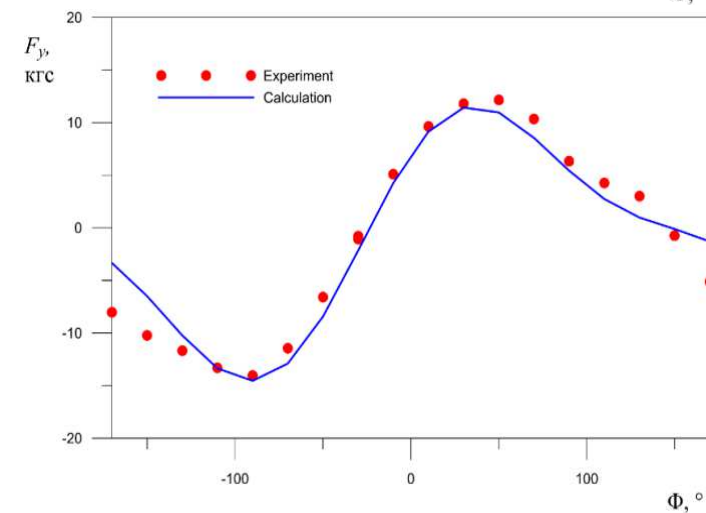
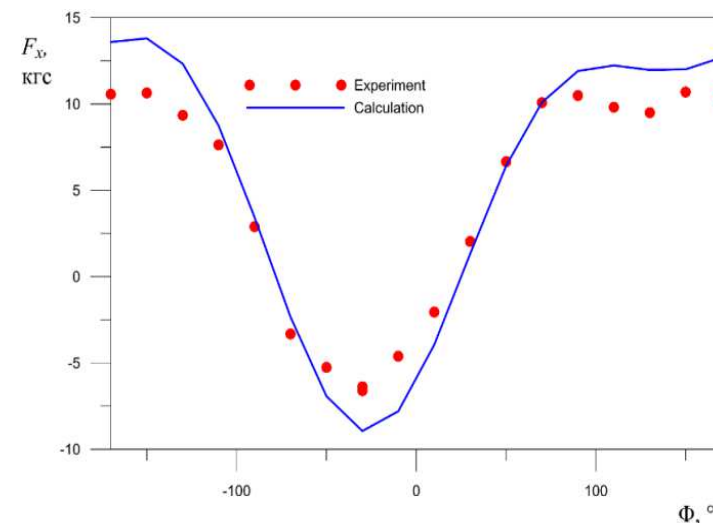




Сравнение результатов моделирования с данными испытаний двигателя в трубе Т-203 СибНИА

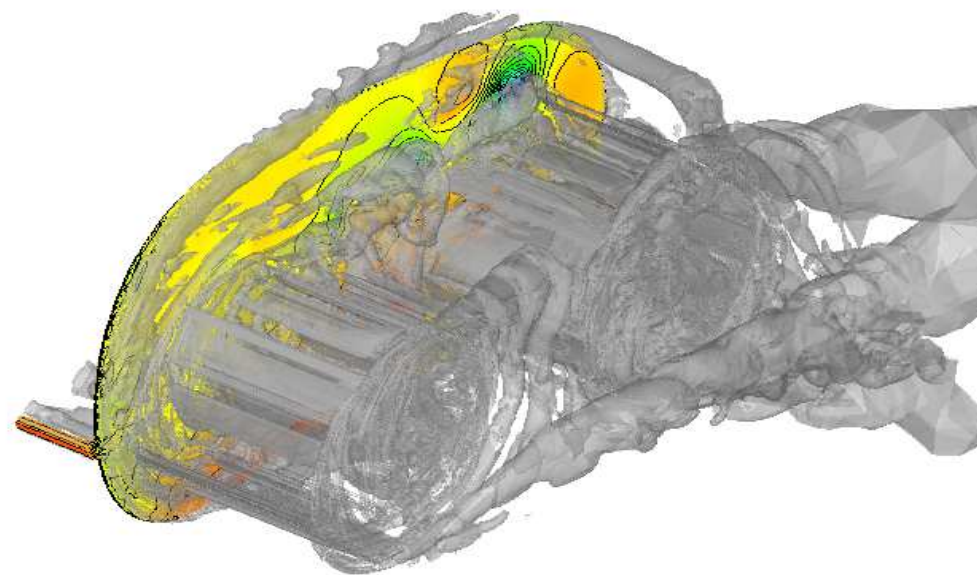
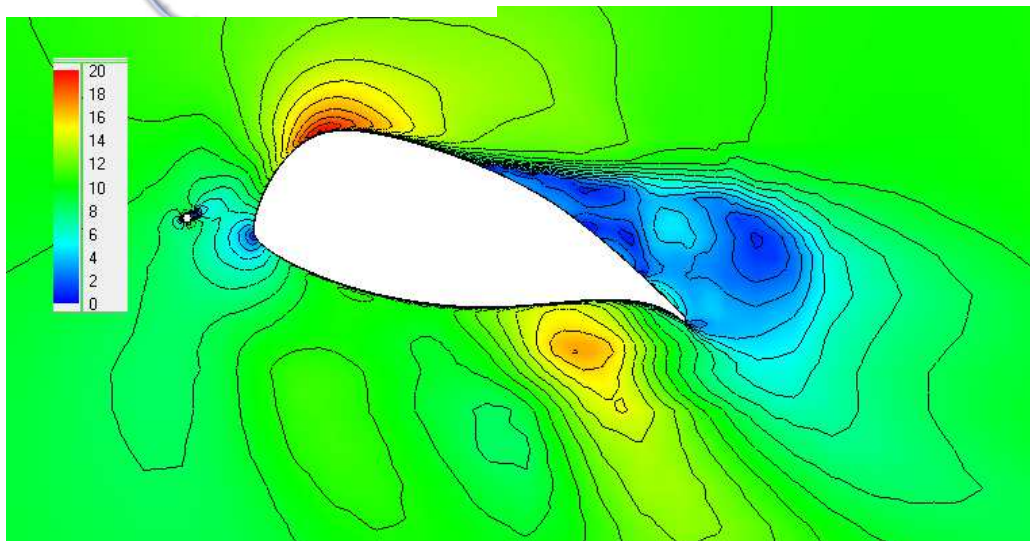
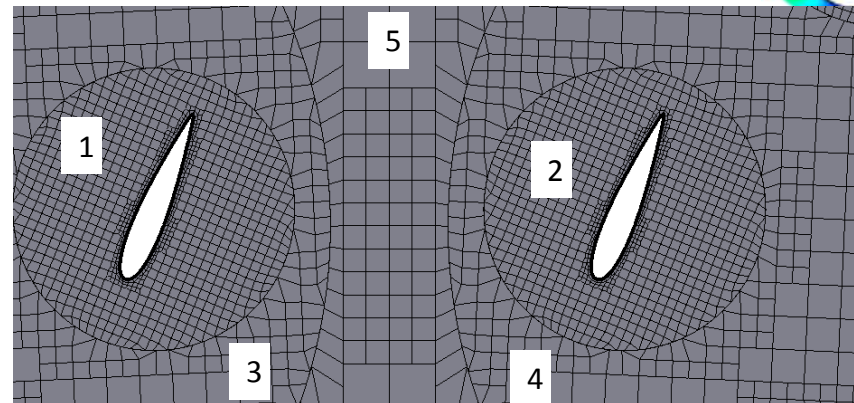
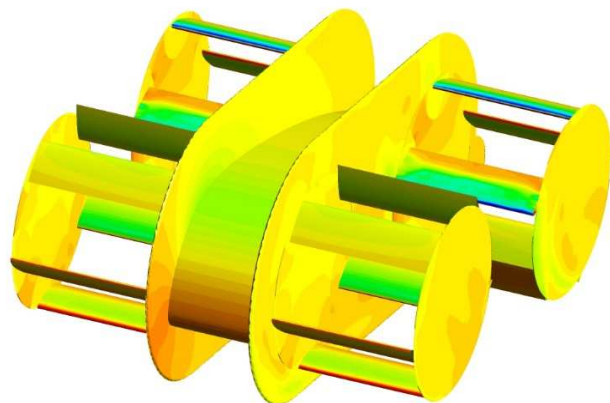
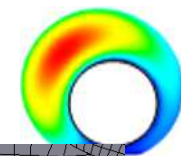


Силы, действующие на ротор при скорости вращения 1000 об/мин и скорости набегающего потока 10 м/с





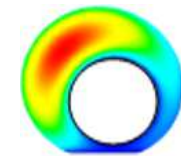
Результат моделирования Демонстратора



модуль скорости в сечении, проходящем через фюзеляж и вихревые структуры



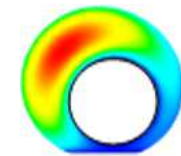
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения дисперсных сред
- Развитие моделей течения неньютоновских жидкостей
- Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими двигателями
- **Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов**
- Свободно распространяемая учебная версия



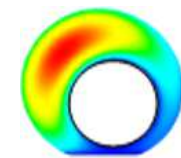
Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов



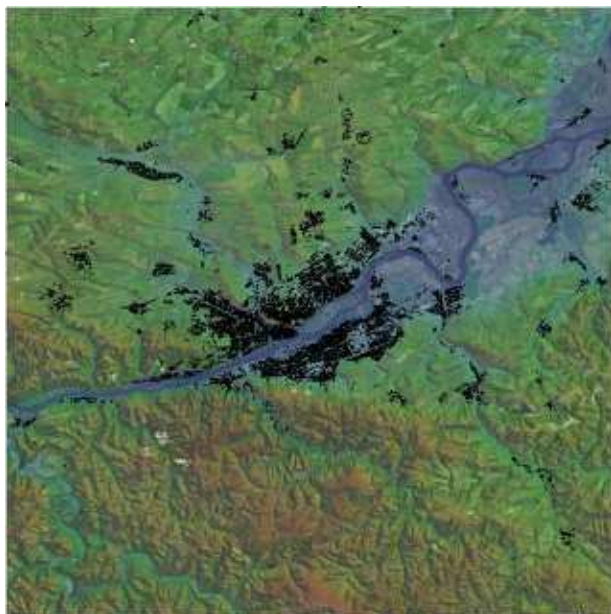
- Микромасштабная математическая модель описывающая динамику атмосферы и режимы **переноса загрязняющих газовых и дисперсных примесей в атмосфере** города Красноярска, с учетом **реального рельефа**, влияния **реки Енисей**, особенностей метеорологических режимов, **воздействия солнечного и теплового излучения**, сопряженного теплообмена с элементами городского (здания) и природного (почва) ландшафта.
- Уравнение сохранения энергии записывается через **потенциальную температуру**. Для переноса частиц используется **диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц**. Для расчета переноса излучения метод конечных объемов с **независимым расчетом длинноволнового и коротковолнового полей излучения**. Для определения температуры на поверхности используется **модель сопряженного теплообмена**.
- В математической модели для **задания граничных и начальных условий** и описания объемных источников загрязнений используется данные, разработанной системы сбора **информации о состоянии окружающей среды и метеоусловий** г. Красноярска.
- Для построения расчетной области используются **GIS данные цифровой модели рельефа** высокого разрешения (15м) и проекта **OpenStreetMap** для учета городских построек.



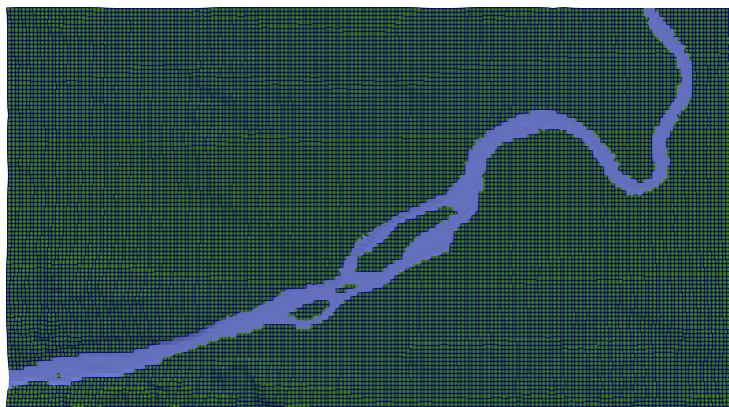
Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов



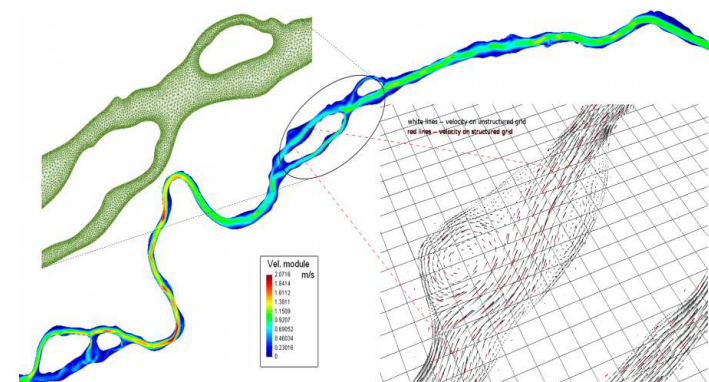
Карта высот в районе г. Красноярск



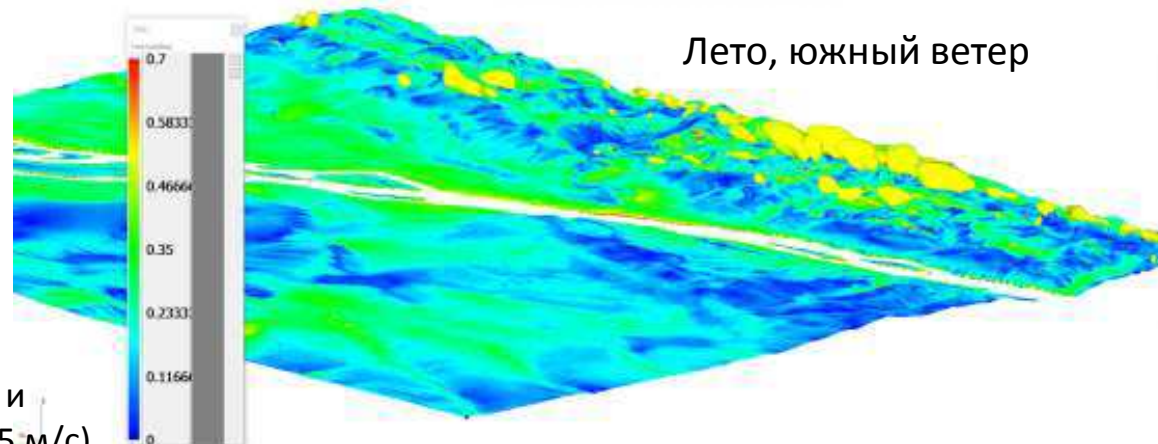
Фрагмент расчетной сетки



Течение реки



Лето, южный ветер

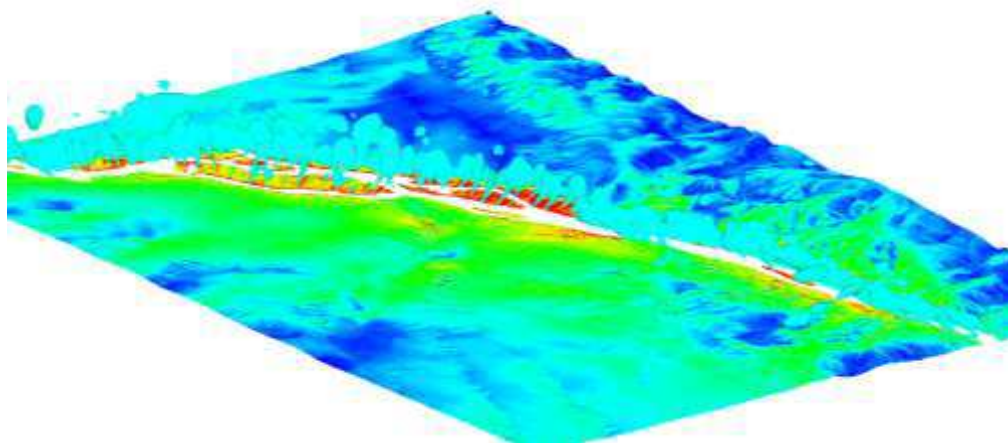
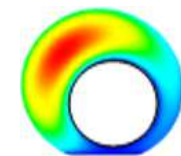


Поле скорости в приземной области (м/с) и изоповерхность $V_z = 0.5$ м/с

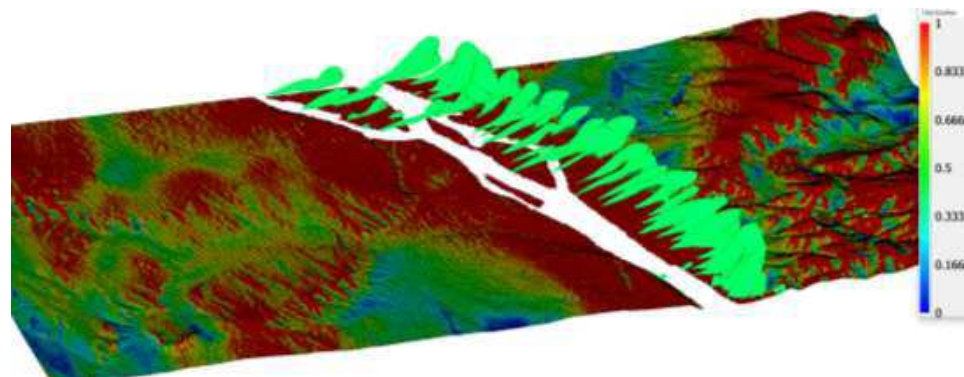


Моделирование распространения экологически вредных выбросов

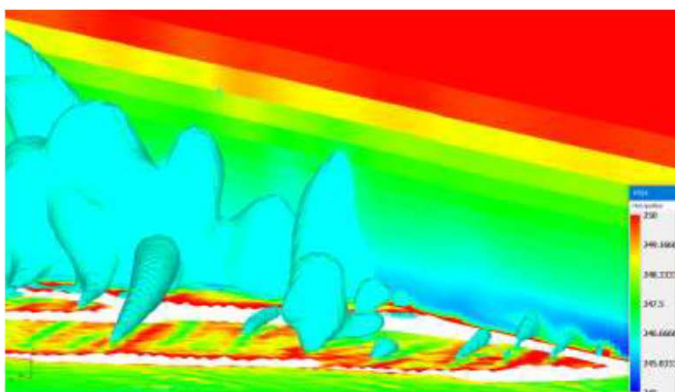
Зима, западный ветер



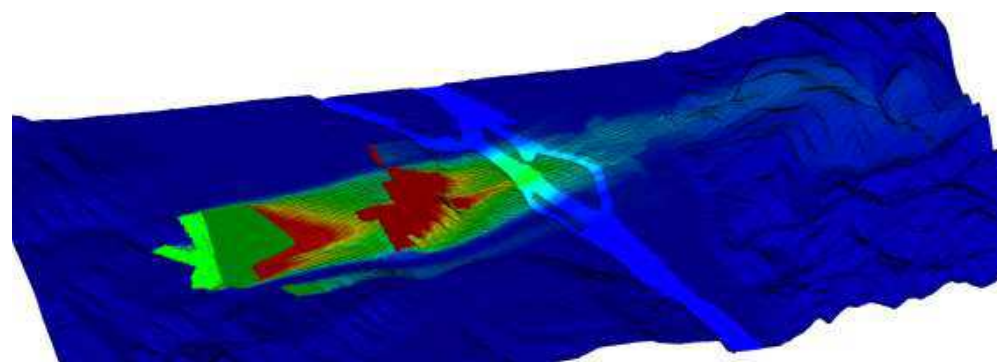
Поле скорости в приземной области (м/с) и изоповерхность V_z – компоненты скорости (0.5 м/с)



Распределение скорости в приземной области и изоповерхность V_z –компоненты скорости (1м/с)



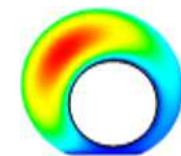
Поле потенциальной температуры (К) и изоповерхность V_z – компоненты скорости (0.5 м/с)



Относительная концентрация частиц ($d_{ch} = 10 \text{ мкм}$) при скорости ветра 1м/с



Моделирование распространения экологически вредных выбросов



Сепарация частиц 10 мкм из пылевого облака при различной ветровой нагрузке

Поле распределения относительных концентраций частиц



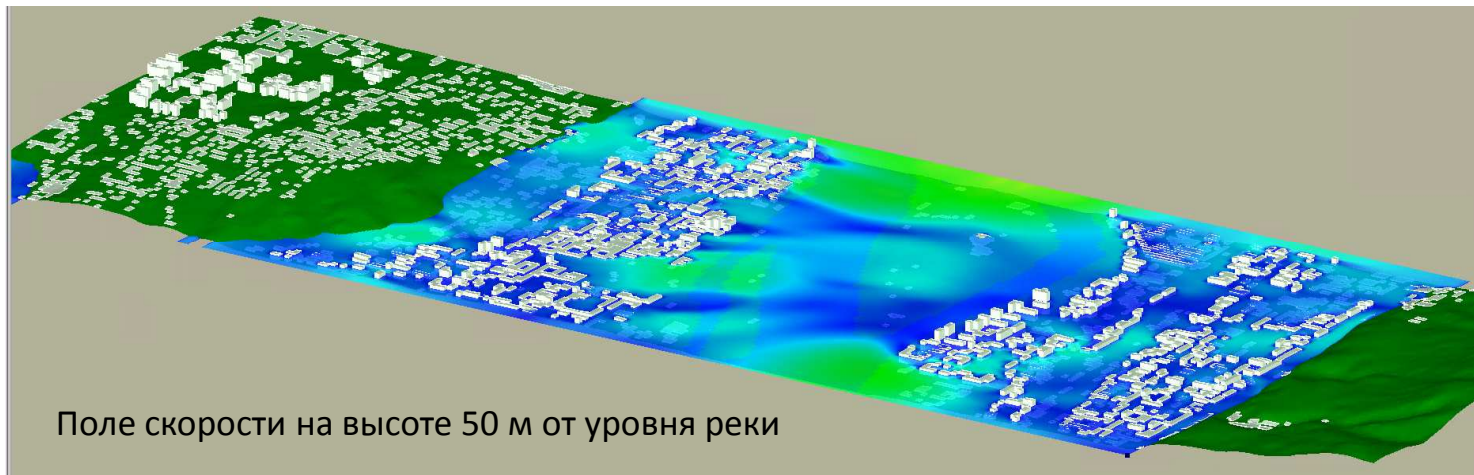
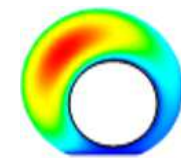
Западный ветер 1 м/с



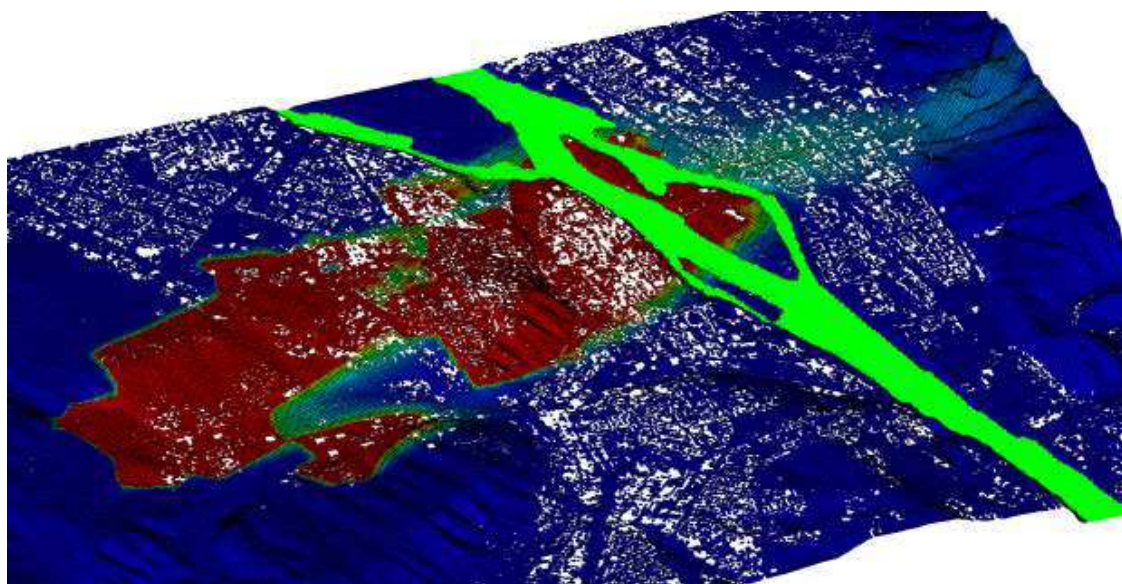
Западный ветер 5 м/с



Моделирование распространения экологически вредных выбросов



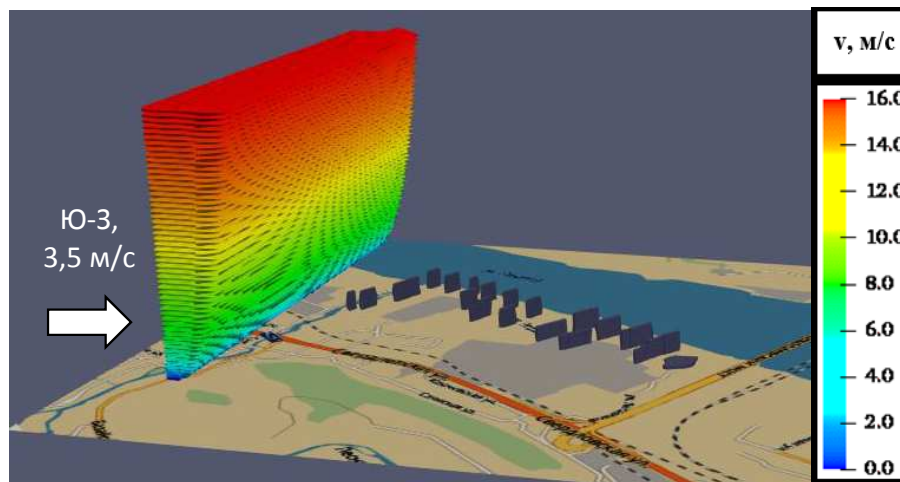
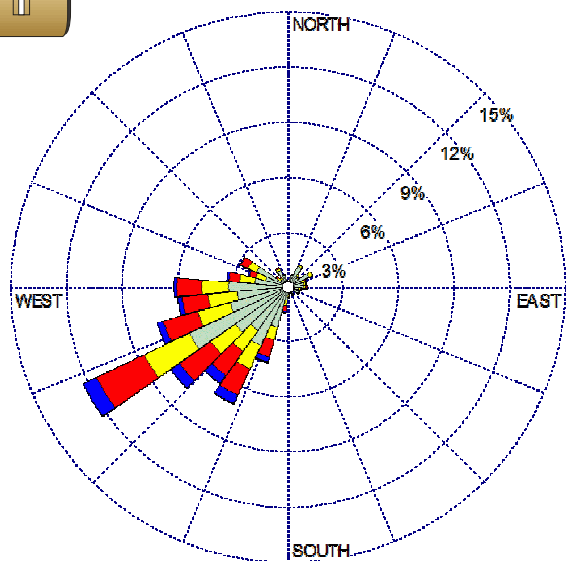
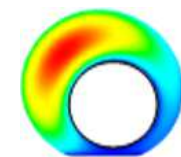
Поле скорости на высоте 50 м от уровня реки



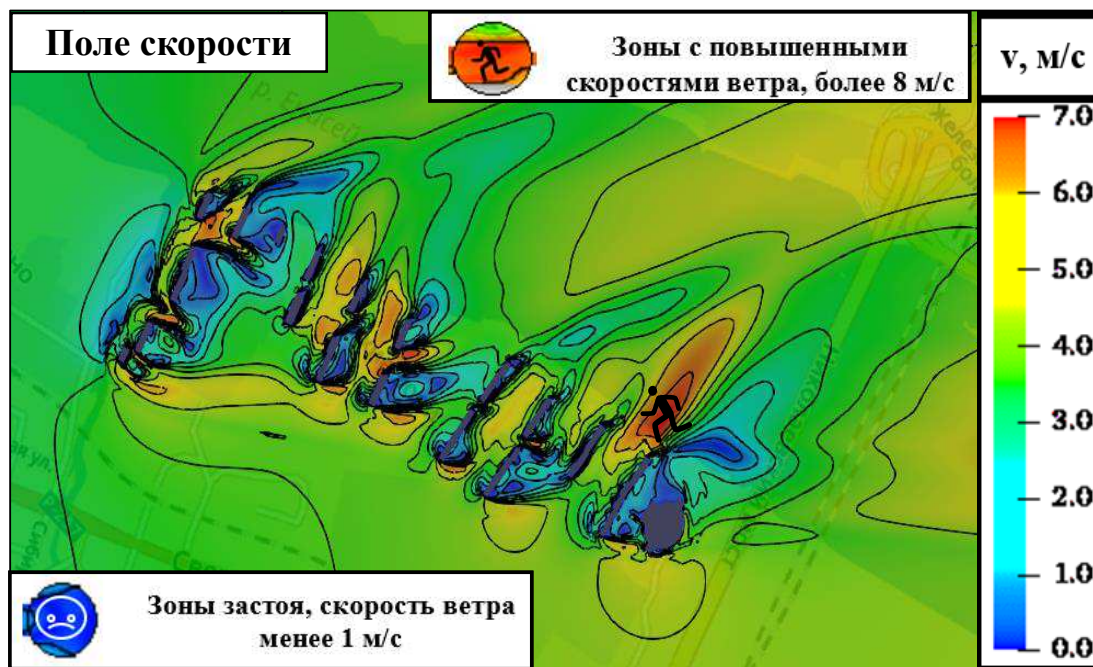
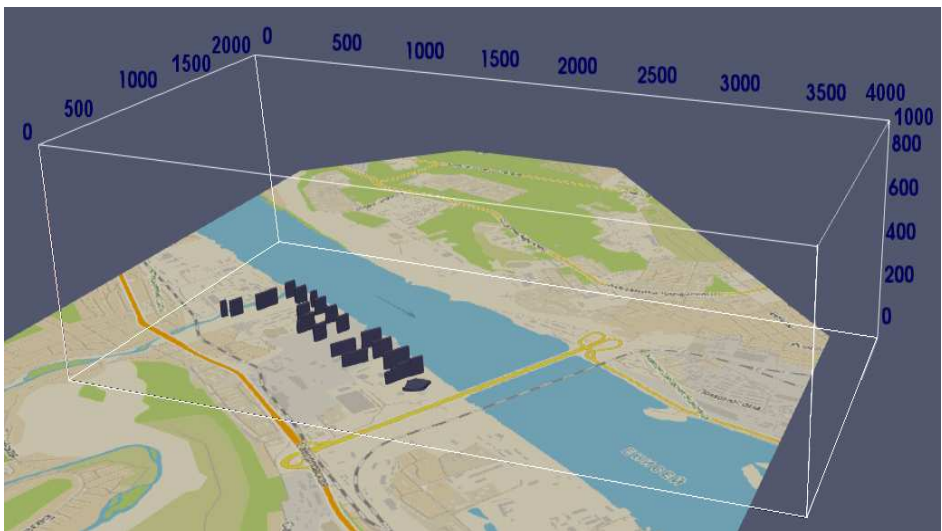
Распределение относительной концентрации частиц в приземной области.



Влияние высотной застройки на перемешивание атмосферного воздуха

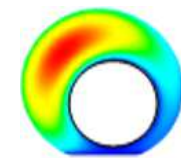


Начальный
профиль
распределения
скорости ветра



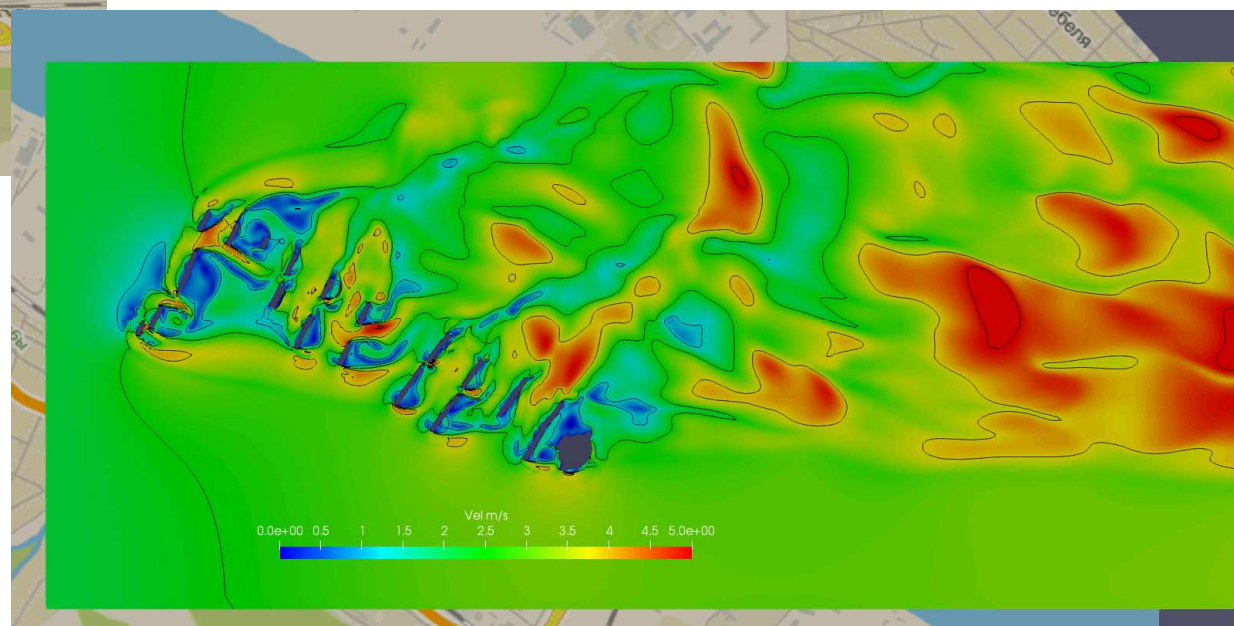


Влияние высотной застройки на перемешивание атмосферного воздуха



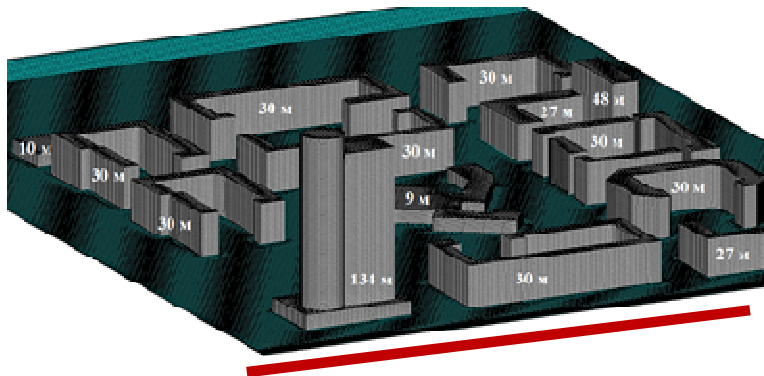
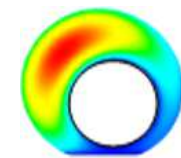
Динамика вихревых структур

Магнитуа скорости в горизонтальном сечении ($h = 2$ м)

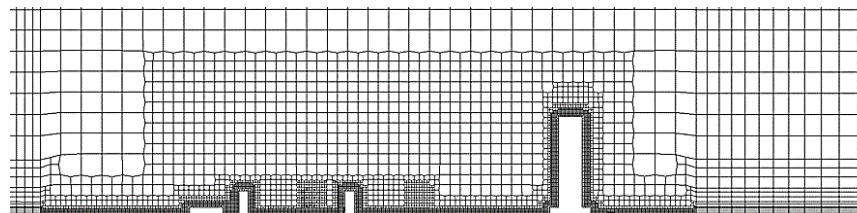




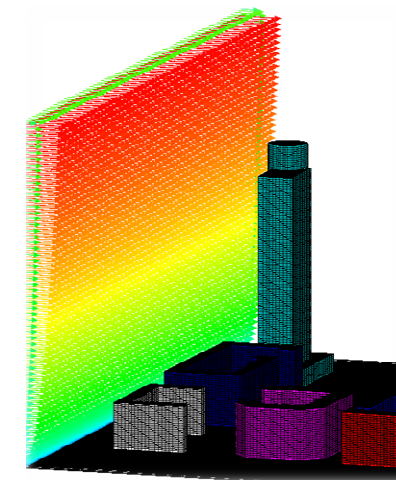
Исследование ветровых потоков в зонах жилой застройки



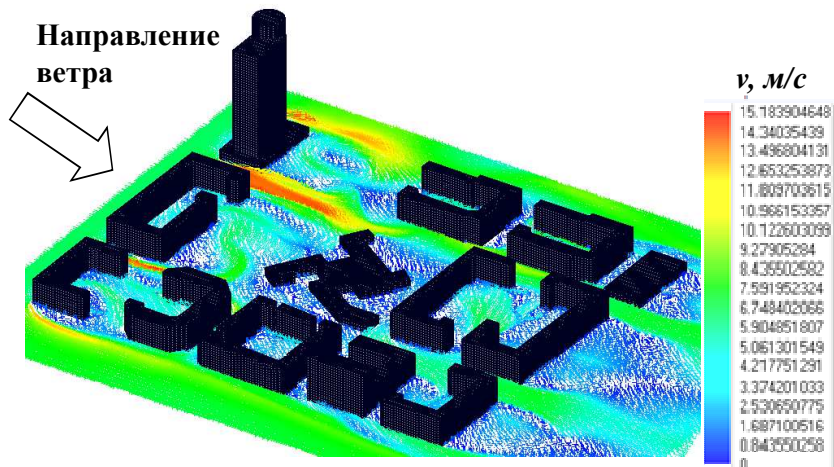
Геометрия рассматриваемого района



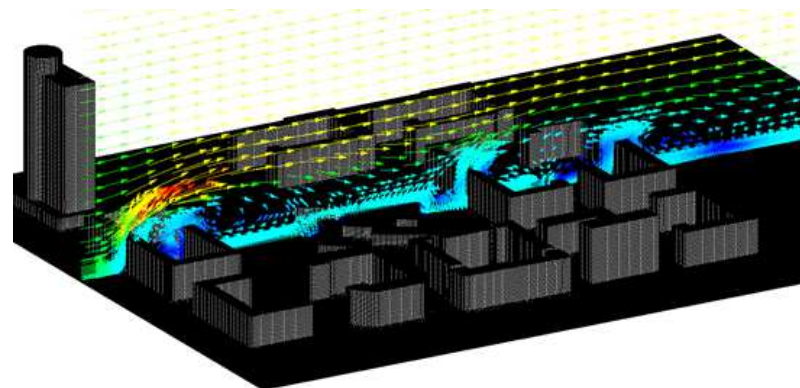
Неструктурированная гексагональная расчетная сетка



начальное распределение скорости



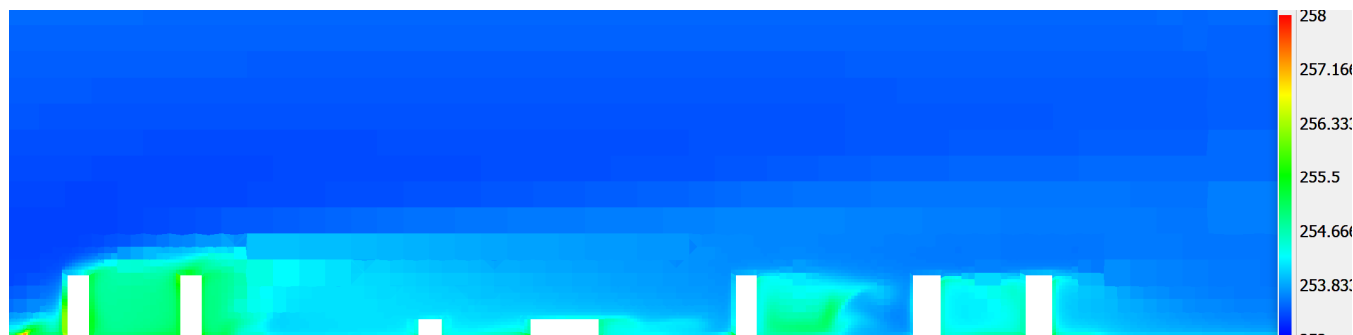
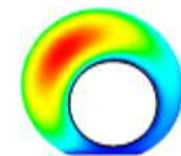
Поле скорости в горизонтальном сечении на уровне 2 м



Поле скорости в вертикальном сечении

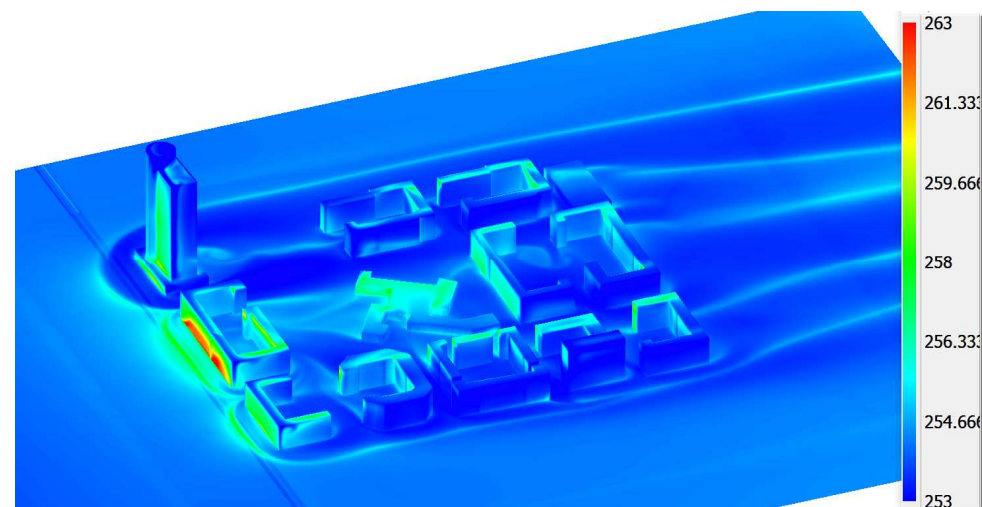


Анализ локального влияния теплообмена в городской застройке



Поле потенциальной температуры, зима (K). Тепловой остров над городским кварталом в вертикальном сечении

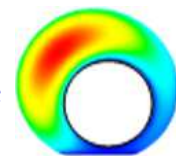
В зимнее время **максимальные температуры** наблюдаются **на поверхностях стен**, которые находятся под прямым солнечным излучением (не в тени). При этом **максимальный прогрев** наблюдается на **стене здания первого ряда со стороны набегающего потока**, расположенного в центральной части квартала. Это связано с тем, на этом здании происходит максимальное торможение потока и поэтому конвективное охлаждение минимально.



Поле потенциальной температуры, зима (K). Тепловой остров над городским кварталом на поверхности

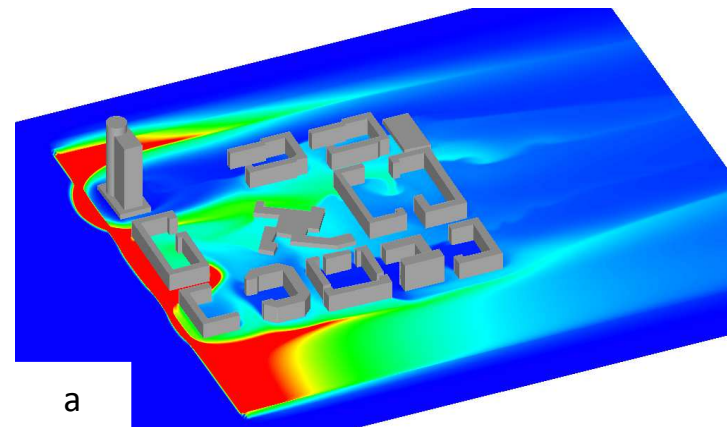
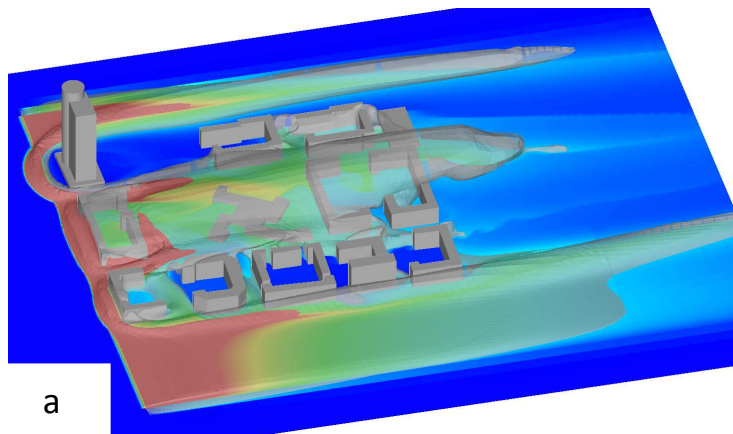


Анализ локального влияния теплообмена в городской застройке



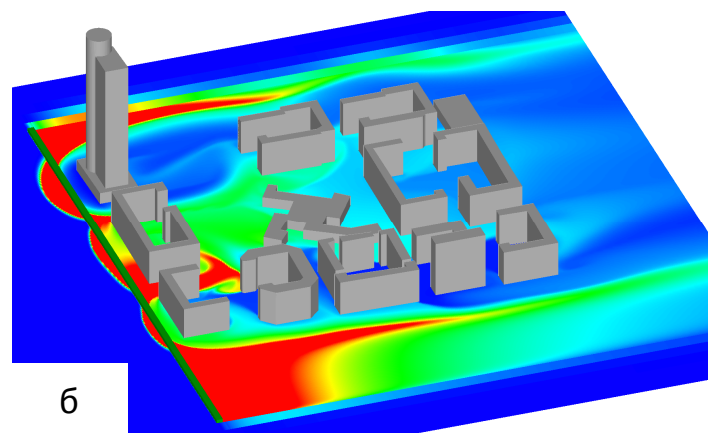
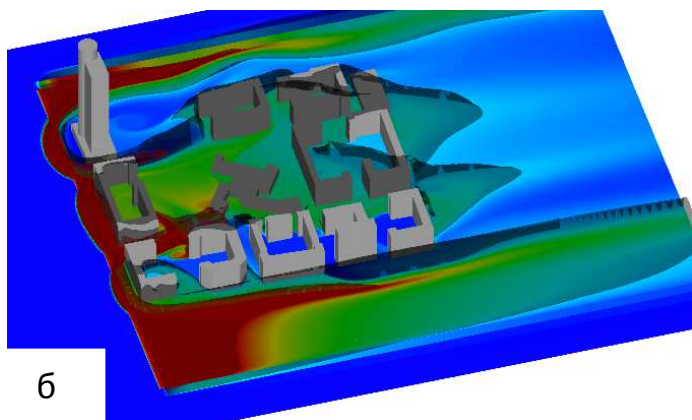
Поле относительной концентрацией частиц 2,5 мкм

Поле относительной концентрации диоксида углерода



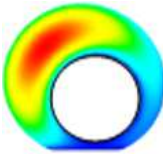
Зима: а) с учетом теплообмена, б) без учета теплообмена

Зима: а) с учетом теплообмена, б) без учета теплообмена





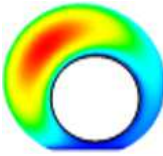
SigmaFlow – 2020



- Развитие моделей течения дисперсных сред
- Развитие моделей течения неньютоновских жидкостей
- Специализированная версия для расчета ЛА с циклическими движителями
- Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов
- **Свободно распространяемая учебная версия**



SigmaFlow учебная свободно распространяемая версия



Решаемый класс задач

- стационарные и нестационарные течения
- ламинарные и турбулентные течения
(RANS, DES, PANS, LES)
- теплообмен (теплопроводность, конвекция, излучение)
- многофазность (Лагранж, Эйлер)

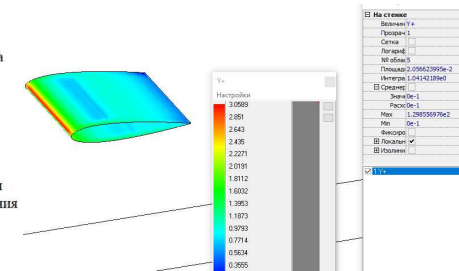
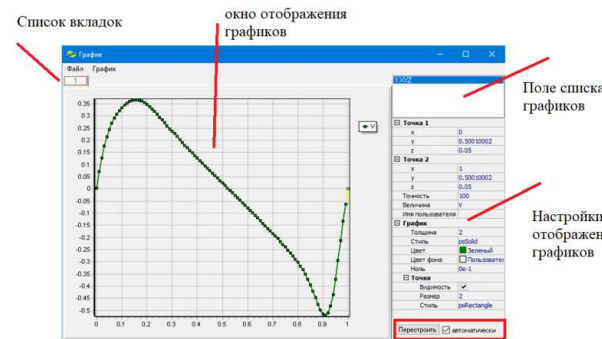
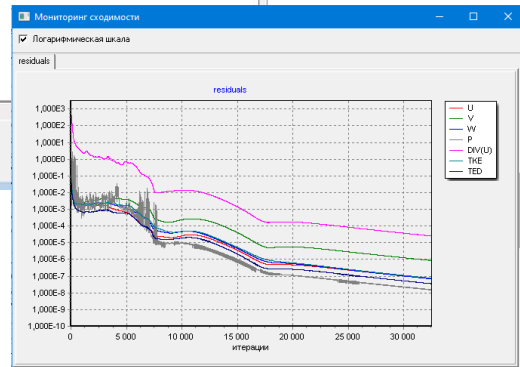
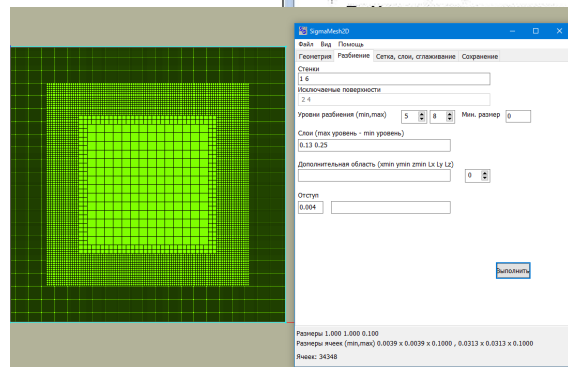
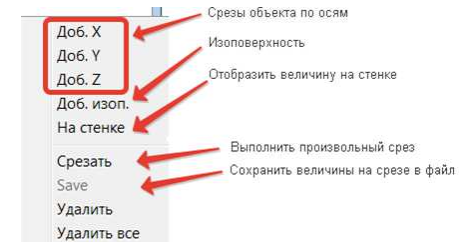
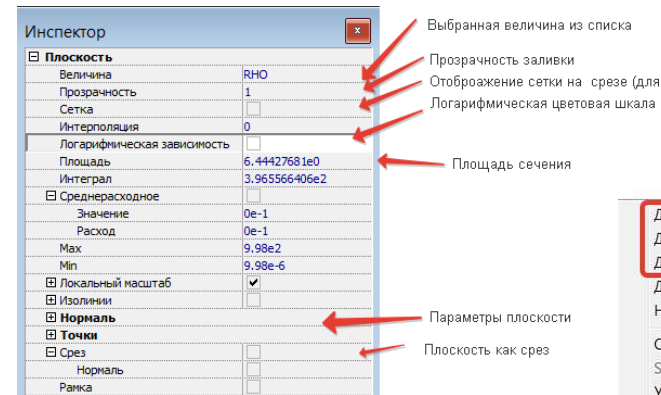
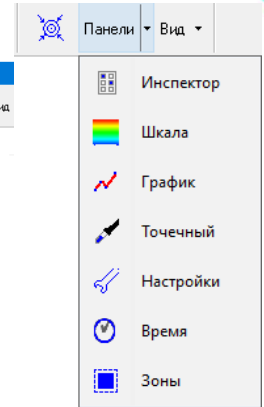
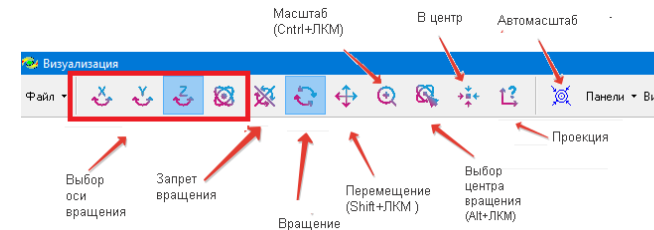
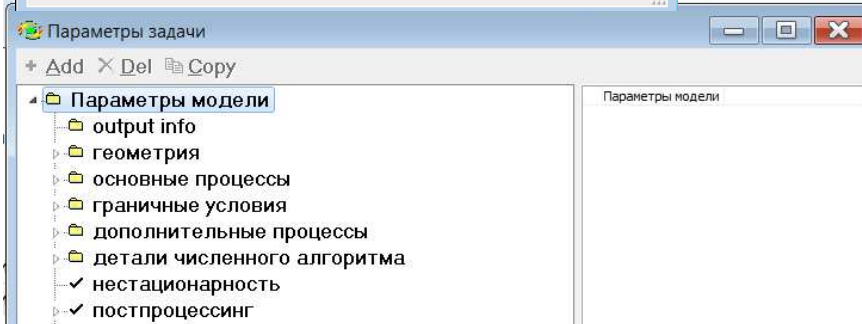
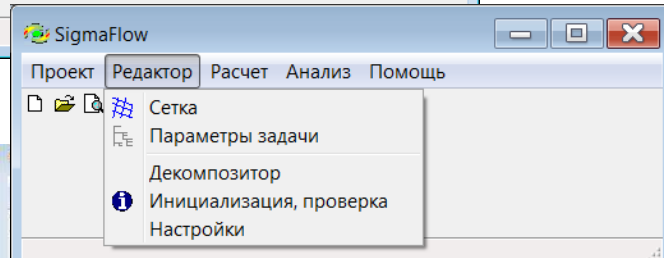
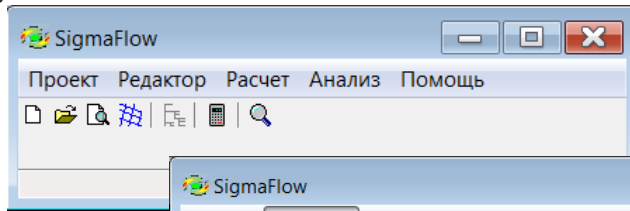
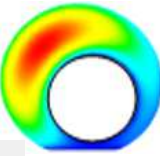
Построение и импорт расчетной сетки

- импорт 2D геометрии из внешней CAD системы,
автоматическое построение 2D quadro-сетки,
процедуры преобразования сетки в 3D (поворот,
смещение)
- импорт 3D расчетной сетки
- импорт 3D геометрии из внешней CAD системы,
- автоматическое построение 3D окто-сетки

Постпроцессинг

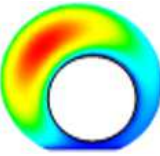


SigmaFlow учебная свободно распространяемая версия



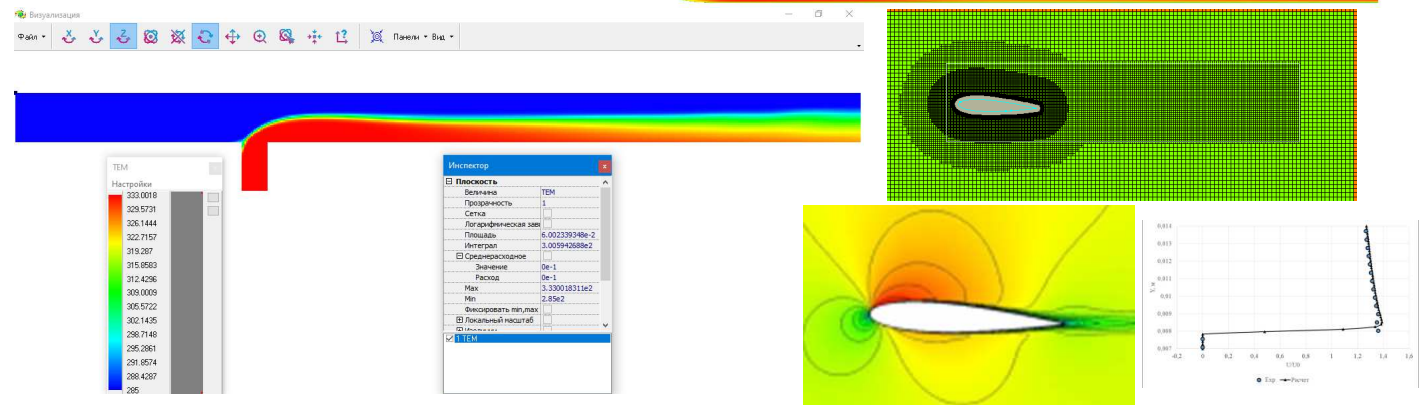
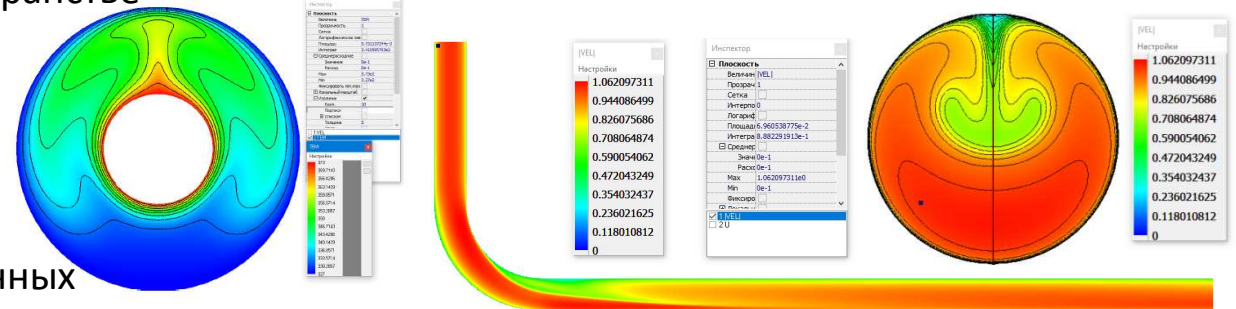
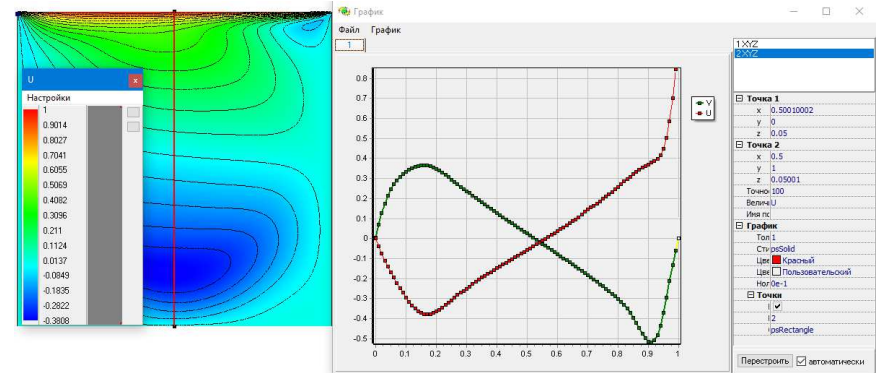


SigmaFlow учебная свободно распространяемая версия



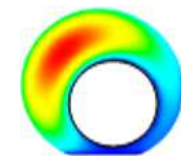
Учебные примеры

- Ламинарное течение в плоской каверне с подвижной верхней крышкой
- Свободная конвекция, протекающая в пространстве между двумя цилиндрами
- Турбулентное течение в трубе круглого сечения с поворотом на 90°
- Турбулентное течение в Т-образно соединенных прямоугольных каналах
- Обтекания гидрокрыла NACA0015





CFD-weekend 2020



**Комплекс программ SigmaFlow:
современное состояние, новые задачи**

Гаврилов А.А., Дектерёв А.А

Институт Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе
Красноярский филиал

Спасибо за внимание!