



# Разработка решателя *snowYadeFoam* для моделирования динамики снежных частиц

Дарья Романова, Сергей Стрижак, Матвей Крапошин

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

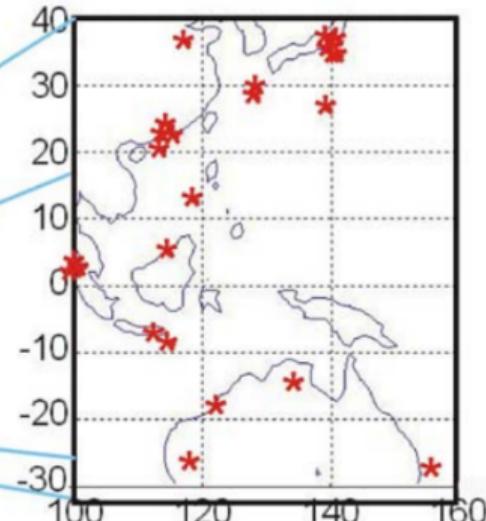
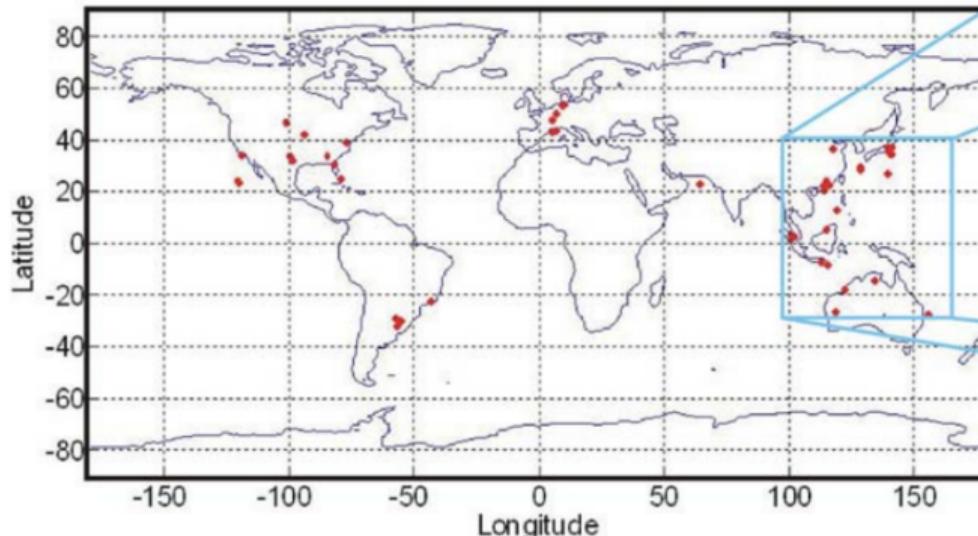
2020



Обледенение линий электропередач (Poots и Makkonen 2000)



Ледяные нарости на поверхности секции крыла



Геолокация 46 инцидентов с потерей мощности из-за обледенения в условиях снега и метели (Mason, Strapp и Chow 2006)

## Объект исследования

В данной работе рассматривается задача обтекания потоком воздуха с кристаллами снега модельного тела.

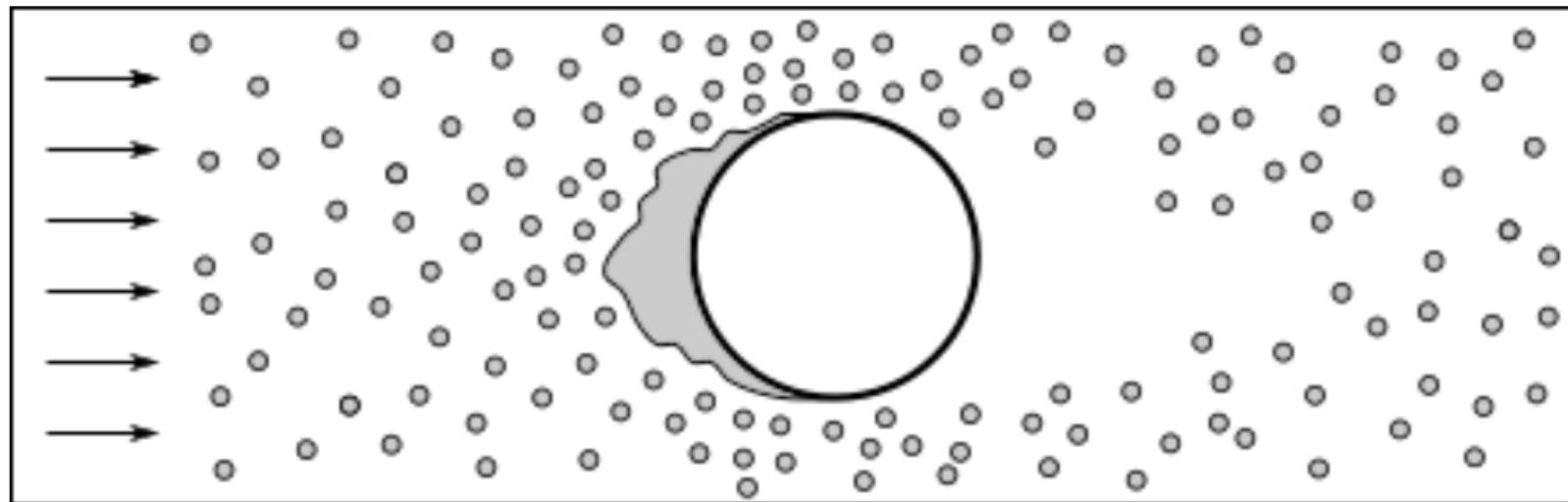


Схема задачи обледенения цилиндра

- ▶ Обтекаемое модельное тело: цилиндр радиусом  $R = 10$  см
- ▶ Обтекание в трубе прямоугольного поперечного сечения
- ▶ Частицы имеют сферическую форму и разные диаметры  $d = 3 \pm 1.5$  мм
- ▶ Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами  $1 \times 0.4 \times 0.4$  м<sup>3</sup>
- ▶ Количество расчетных ячеек для CFD расчета составило 240000
- ▶ Плотность частиц в расчетной области задавалась равной 1000 шт./м<sup>3</sup>

В работе используется Эйлер-Лагранжев подход — сопряженный метод на базе методов вычислительной газодинамики и метода дискретных элементов (МДЭ).

### Математическая модель МДЭ

Баланс сил и крутящих моментов для частицы с индексом  $i$  выглядит так:

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_{i,n} + \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{F}_{i,f} + \mathbf{F}_{i,b}, \quad I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \mathbf{r}_{i,c} \times \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{T}_{i,f} + \mathbf{T}_{i,r},$$

$\mathbf{F}_{i,n}$  — нормальная составляющая силы взаимодействия частиц,

$\mathbf{F}_{i,t}$  — тангенциальная составляющая силы взаимодействия частиц,

$\mathbf{F}_{i,f}$  — сила, которую окружающая жидкость может оказывать на частицы,

$\mathbf{F}_{i,b}$  — другие массовые силы,

$\mathbf{T}_{i,f}$  — крутящий момент, который окружающая жидкость может передавать на частицы,

$\mathbf{T}_{i,r}$  — дополнительный крутящий момент, приложенный к частице.

### Математическая модель вычислительной гидродинамики

Рассматривается точечное взаимодействие частиц и сплошной среды (частицы не рассматриваются как отдельная фаза). В этом случае уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \mathbf{U}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla \tau + \mathbf{f}_h, \quad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0.$$

$\mathbf{U}$  — скорость сплошной среды,

$p$  — давление,

$\rho$  — плотность среды,

$\tau$  — тензор вязких напряжений,

$\mathbf{f}_h$  — сила, возникающая в следствии взаимодействия частиц с потоком.

## Силы при взаимодействии частиц с потоком

Сила, действующая на частицу со стороны потока представляется в виде точечной силы, и рассчитывается по формуле Ишизаки (Sato и др. 2008), рассчитанной для снежных частиц:

$$\mathbf{F}_h = V_p K (\mathbf{U}_f - \mathbf{U}_p), \quad K = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_f}{d_p} |\mathbf{U}_f - \mathbf{U}_p|,$$

$$C_d = 5.35 Re^{-0.28}.$$

Здесь  $V_p$  — объём частицы,  $\mathbf{U}_f$  — скорость потока среды,  $\mathbf{U}_p$  — скорость частицы, число Рейнольдса  $Re$  рассчитывается по диаметру частицы.

Данная сила, действующая на сплошную среду со стороны частиц (объёмная сила):

$$\mathbf{f}_h = -\mathbf{F}_h / V_c \rho_f.$$

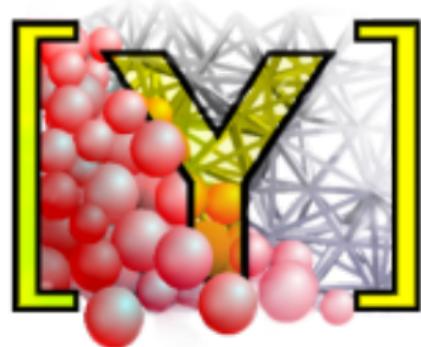
### Крутящий момент при взаимодействии частиц с потоком

При взаимодействии частиц с потоком, окружающая среда может прилагать момент к частице:

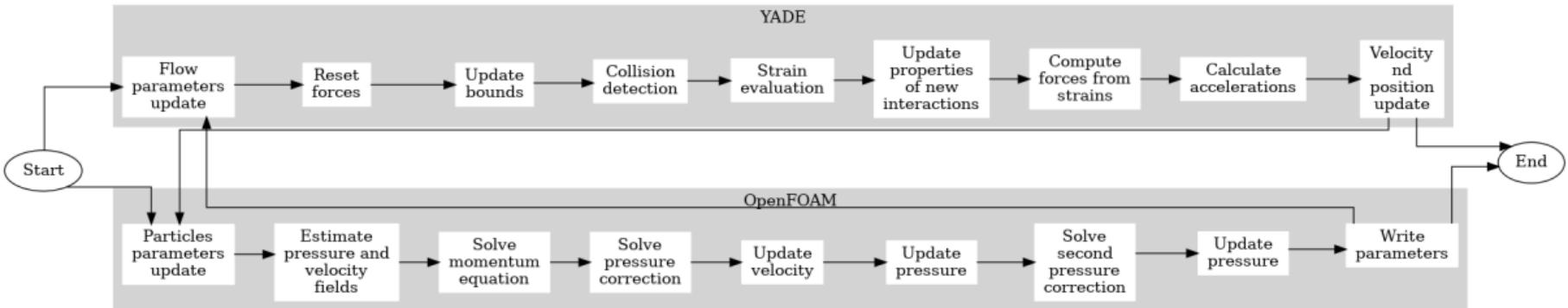
$$\mathbf{T}_{i,f} = 8\pi d_p^3 \mu_f (\omega_f - \omega_p).$$

Здесь  $\omega_f$  — угловая скорость потока, вычисленная в центре частицы,  
 $\omega_p$  — угловая скорость частицы,  
 $\mu_f$  — вязкость потока.

Для расчёта поставленной задачи используется объединение двух свободно распространяемых пакетов с открытым исходным кодом: YADE и OpenFOAM.



Open $\nabla$ FOAM

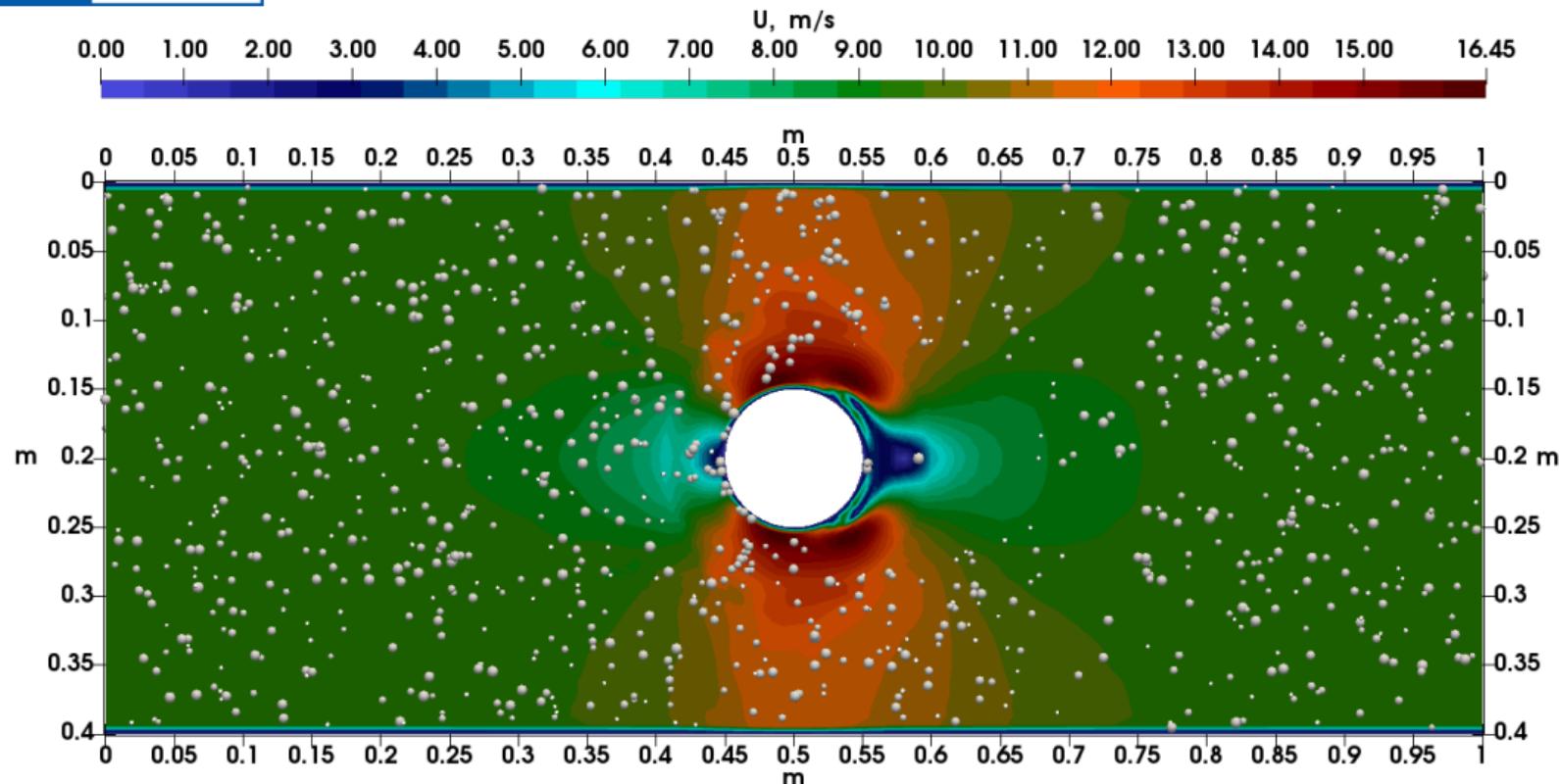


Моделируется обтекание цилиндра в трубе прямоугольного поперечного сечения.

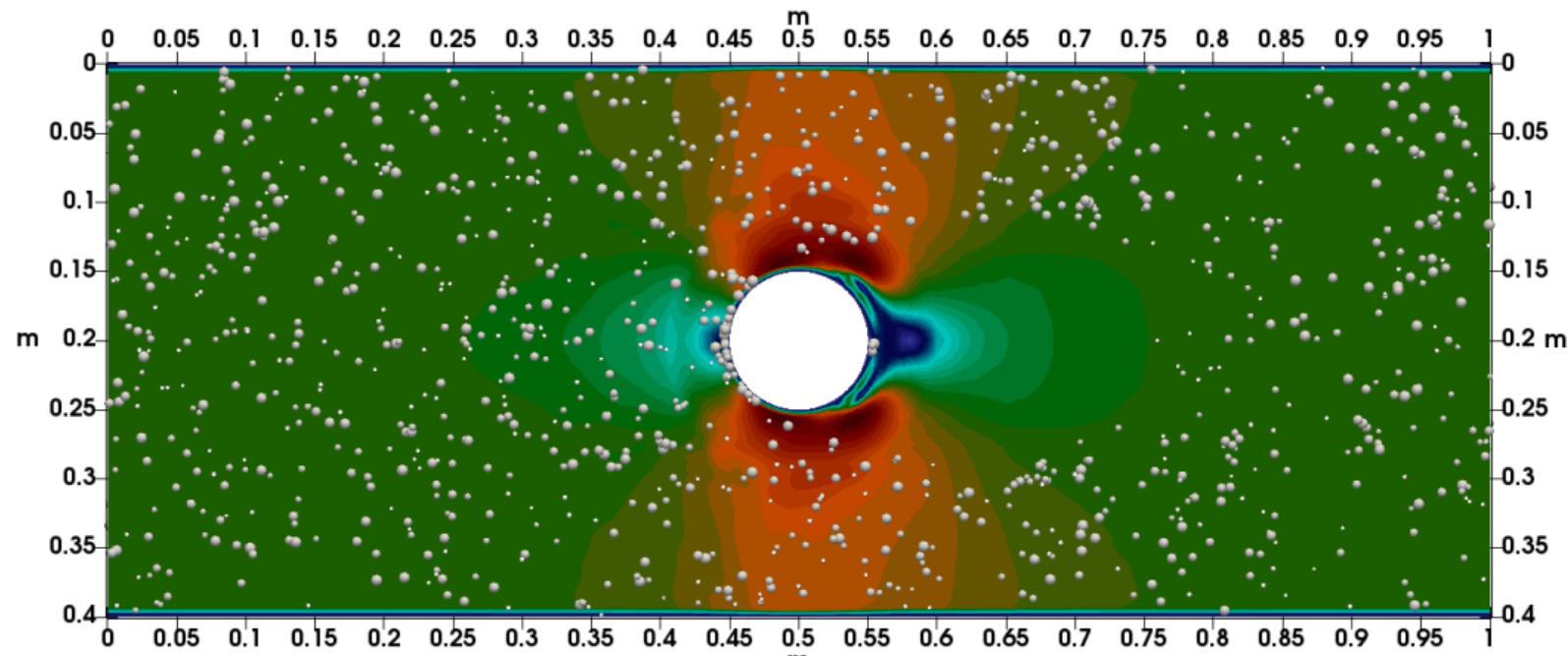
- ▶ На стенках трубы задано условие прилипания.
- ▶ На входе и выходе из рассматриваемой области трубы заданы циклические граничные условия.
- ▶ На входе и выходе из расчётной области скорость потока составляет 10 м/с.

	Поток	Частицы	Цилиндр
Материал	воздух	снег	сталь
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1.2	50	7700
Вязкость, м <sup>2</sup> /с	$1.74 \cdot 10^7$		
Модуль юнга		$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$
Коэффициент Пуассона		0.3	0.3
Угол трения		$15^\circ$	$15^\circ$

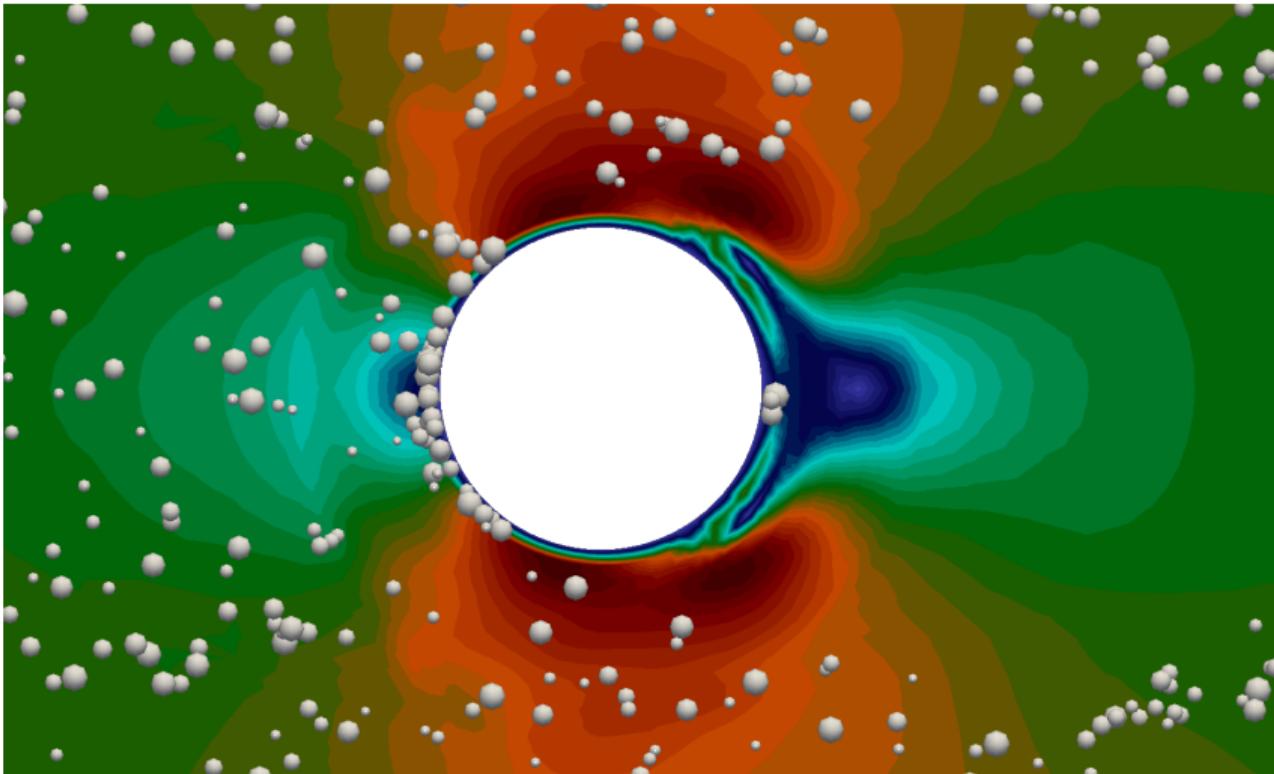
## Результаты

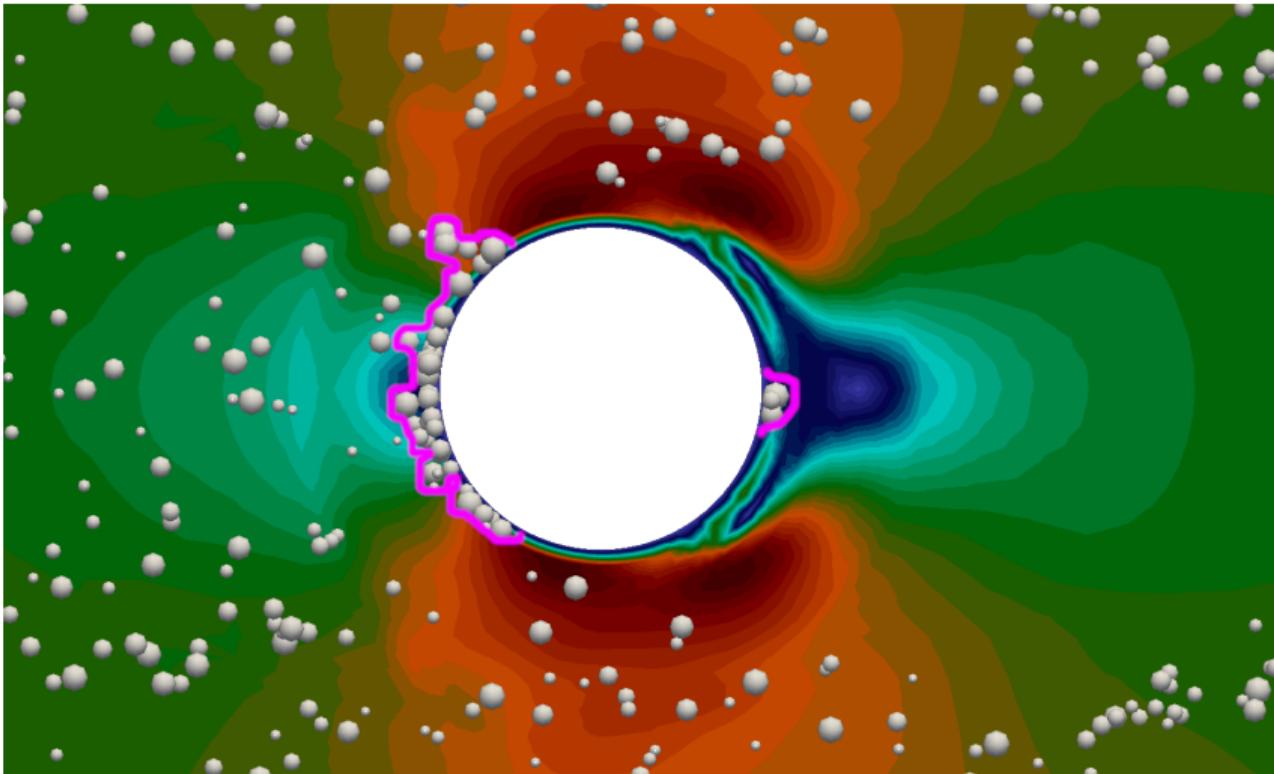


Time = 4 s



Time = 8 s





## Выводы

В работе было проведено моделирование обтекания цилиндра потоком воздуха в трубе прямоугольного поперечного сечения. Было рассчитано 8 секунд процесса, по результатам расчёта можно сделать следующие выводы:

- ▶ метод дискретных элементов хорошо подходит для моделирования адгезии ледяных кристаллов на поверхности модельного тела,
- ▶ максимальная толщина ледяного нароста по нормали к обтекаемому телу составила 2 см,
- ▶ средняя толщина ледяного нароста по нормали к обтекаемому телу составила 1 см,
- ▶ угол налипания снежной корки составил  $110^\circ$ .

Данный подход представляется перспективным в силу возможности моделировать напряжённо-деформированное состояние ледяной корки, процесс её разрушения, взаимодействие частиц сложной формы.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!