



**Докладчик:** Фишер Юлия Владимировна

**Образование:** МГТУ им. Н.Э. Баумана, факультет «Энергомашиностроение»

**Трудовой стаж:** Сотрудник компании ТЕСИС с 2011г.

**Специализация:** Верификационные расчеты в области аэродинамики, климатические расчеты, турбомашиностроение



---

## Использование суперкомпьютера при моделировании трехмерных конвективных потоков в приземной атмосфере

---

Авторы:

Аксенов А.А.

Фишер Ю.В.

Щеляев А.Е.

Абшаев А.М.

Абшаев М.Т.

## Исследовательская программа в ОАЭ в области активного усиления осадков

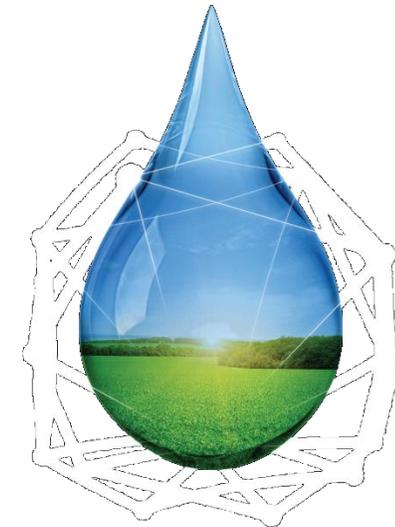
- Исследовательская программа ОАЭ в области изучения активного усиления осадков - инициатива Министерства по делам президента ОАЭ, проводимую под руководством **Национального центра метеорологии и сейсмологии NCMS**
- В соответствии с Национальной инновационной стратегией программа подчеркивает стремление ОАЭ продвигать научные изыскания в области увеличения количества дождевых осадков посредством исследований и разработок.

### Цели:

- Продвижение научных исследований, развития технологий и реализации проектов по увеличению количества дождевых осадков и стимулирование дополнительных инвестиций в исследования и научные партнерства по всему миру.
- Увеличение числа дождевых осадков в ОАЭ и иных засушливых и полусушливых регионах.



برنامج الإمارات لبحوث  
علوم الاستمطار  
UAE Research Program for  
Rain Enhancement Science



# Исследования возможности создания искусственных осадков



Искусственные  
пожары



Двигательные установки



Метеотроны<sup>1</sup>



Традиционные методы  
искусственного увеличения  
осадков - это повышение  
эффективности  
осадкообразования в  
естественных облаках (засев)

<sup>1</sup>Kuznetsov and Konopasov, 2014, 2015

## Предпосылки исследований

- Атмосфера земли содержит  $1,5 \cdot 10^{13}$  тонн водяного пара.
- Облака содержат  $\sim 1\%$  от водяного пара всей атмосферы, и только малая часть этого выпадает в осадки.
- Тепловые острова – источники формирования тепловой конвекции в атмосфере:
  - Конвективные облака над вулканами и возвышенностями;
  - Облакоподобные образования, вызванные за счет мощных источников тепла -  
Pyro-clouds и Industry clouds.



clouds over the volcano



Pyro-cloud over the forest fire



Industry clouds

## Исследования возможности создания искусственных осадков

В данном проекте, в отличие от традиционных подходов, предусматривается **создание искусственных облаков** и осадков в безоблачной атмосфере путем стимулирования искусственной конвекции для развития конвективных облаков.

Рассматриваются:

- метод высокотемпературной струи;
- аэрозольный метод.



## Основные цели численного моделирования

---

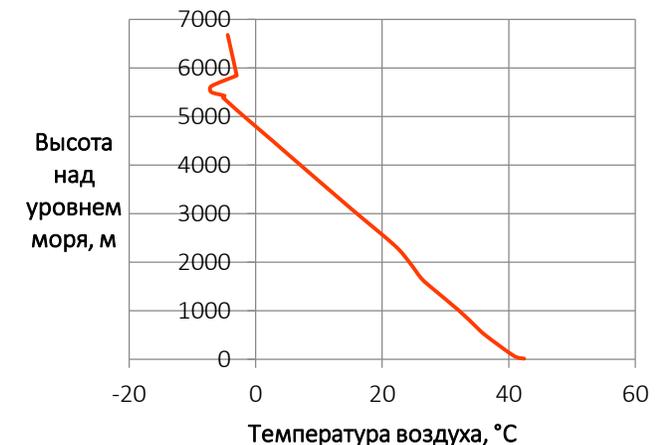
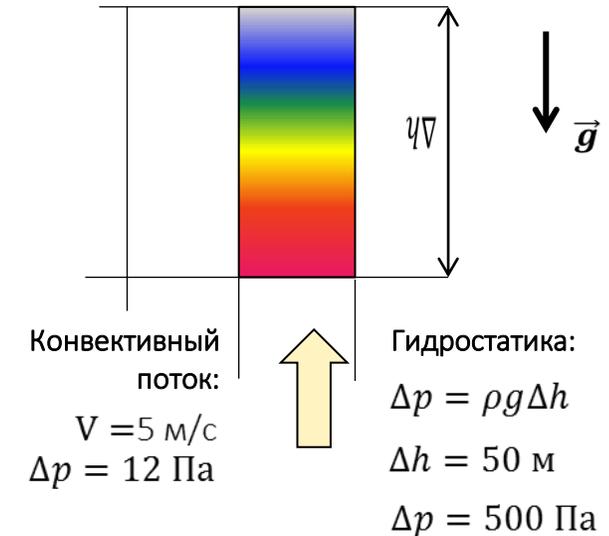
- Численные исследования разных способов искусственного создания конвективных потоков в атмосфере.
- Объяснение структуры течения потоков.
- Выбор наиболее благоприятных условий для экспериментальной отработки способов создания конвективных потоков в атмосфере.



Математическая модель  
атмосферных течений большого  
масштаба

# Проблемы моделирования атмосферных задач

- При вынужденной конвекции в атмосфере, возникают малые изменения физических величин:
  - скорости составляют порядка 5 м/с;
  - перепад давления 12 Па.
- При размере расчетной ячейки по вертикали 50 м перепад давления на ее гранях составляет порядка 500 Па.
- Градиент давления, вызванные конвекцией, существенно меньше гидростатического изменения давления в пределах расчетной ячейки.
- Возникает потеря точности решения при данной постановке задачи.
- Задание реального атмосферного профиля по температуре, влажности, ветру в качестве граничных условий невозможно, так как мы не знаем всех реальных причин их формирования.



**Решение проблем: проводить расчет в относительных величинах.**

# Постановка атмосферных течений больших масштабов

## - Математическая модель

Плотность воздуха – функция от высоты (задается в свойствах вещества):

$$\rho_0(Y) = \frac{P_0(Y)}{RT_0(Y)},$$

Уравнение Навье-Стокса модифицируется заданием дополнительной силы плавучести:

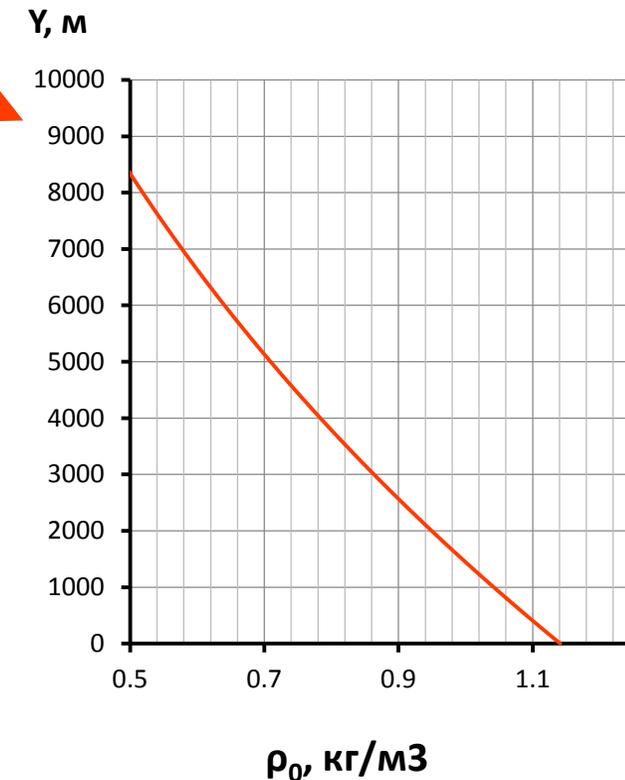
$$\rho_0 \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + Fv$$

$$Fv = -\rho_0(Y) \frac{T'}{T_0(Y)} g,$$

Уравнение энергии решается для термодинамической энтальпии:

$$\frac{\partial \rho_0 h'}{\partial t} + \nabla \rho_0 h' \mathbf{V} = \rho_0 \mathbf{V}_y \left( c_p \frac{\partial T_0}{\partial y} \left( \frac{T'}{T_0} - 1 \right) - g \right) + \nabla (\lambda_t \nabla (T' + T_0))$$

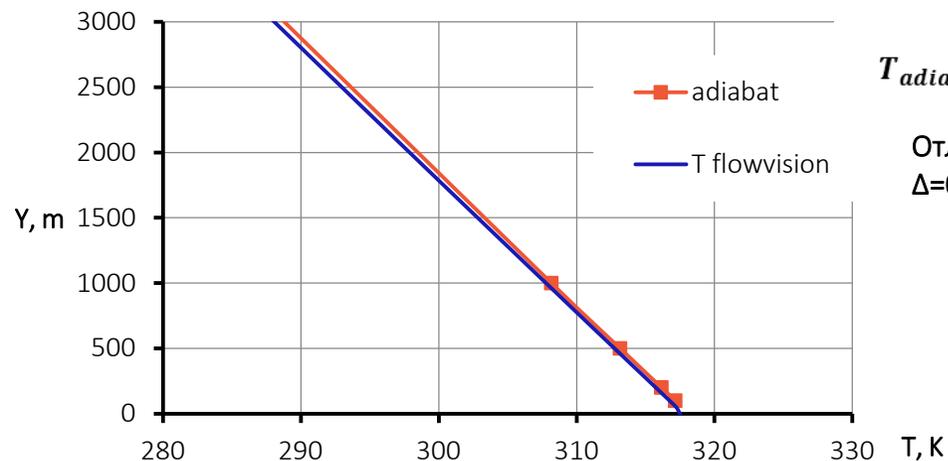
Работа против сил тяжести учитывается дополнительным членом



Верификация  
модели атмосферных течений большого  
масштаба

# Верификационные расчеты

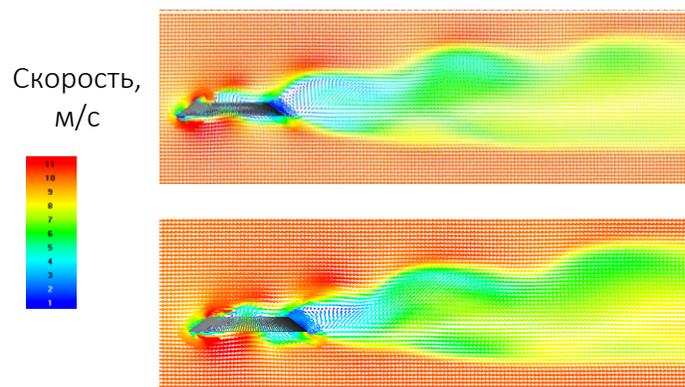
1. Адиабатический подъем нагретого воздуха в вертикальной «трубе» высотой 6 км без трения с постоянной скоростью



$$T_{adiabat}(Y) = T_0 \cdot \left(\frac{p(Y)}{p_0}\right)^{1-1/k}$$

Отличие температуры  $\Delta=0,1\%$

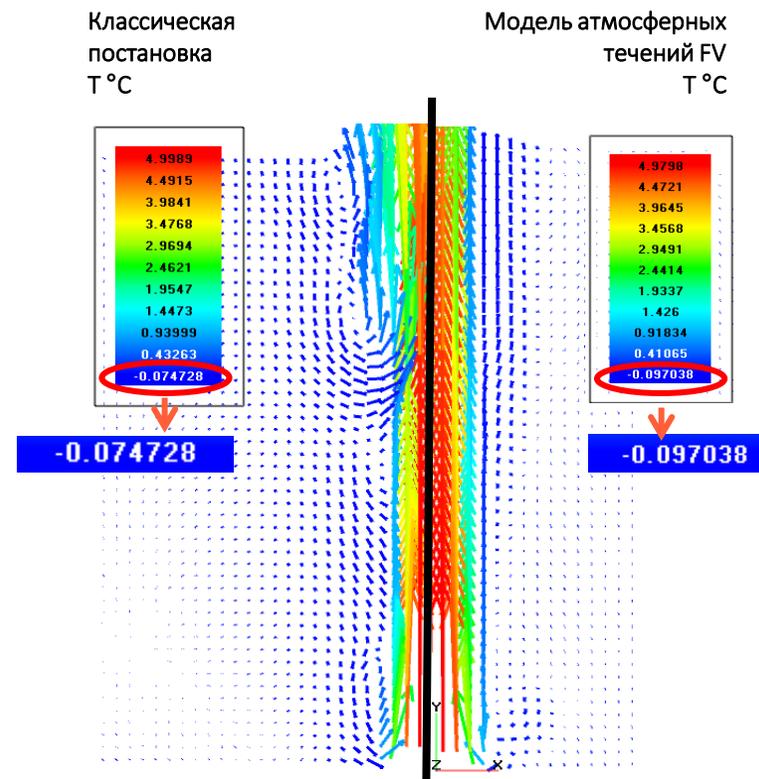
2. Обтекание одиночного конуса



Постановка со сжимаемым воздухом

Модель атмосферных течений FV

Отличие средней температуры по поверхности 3,6%, силы сопротивления 3%



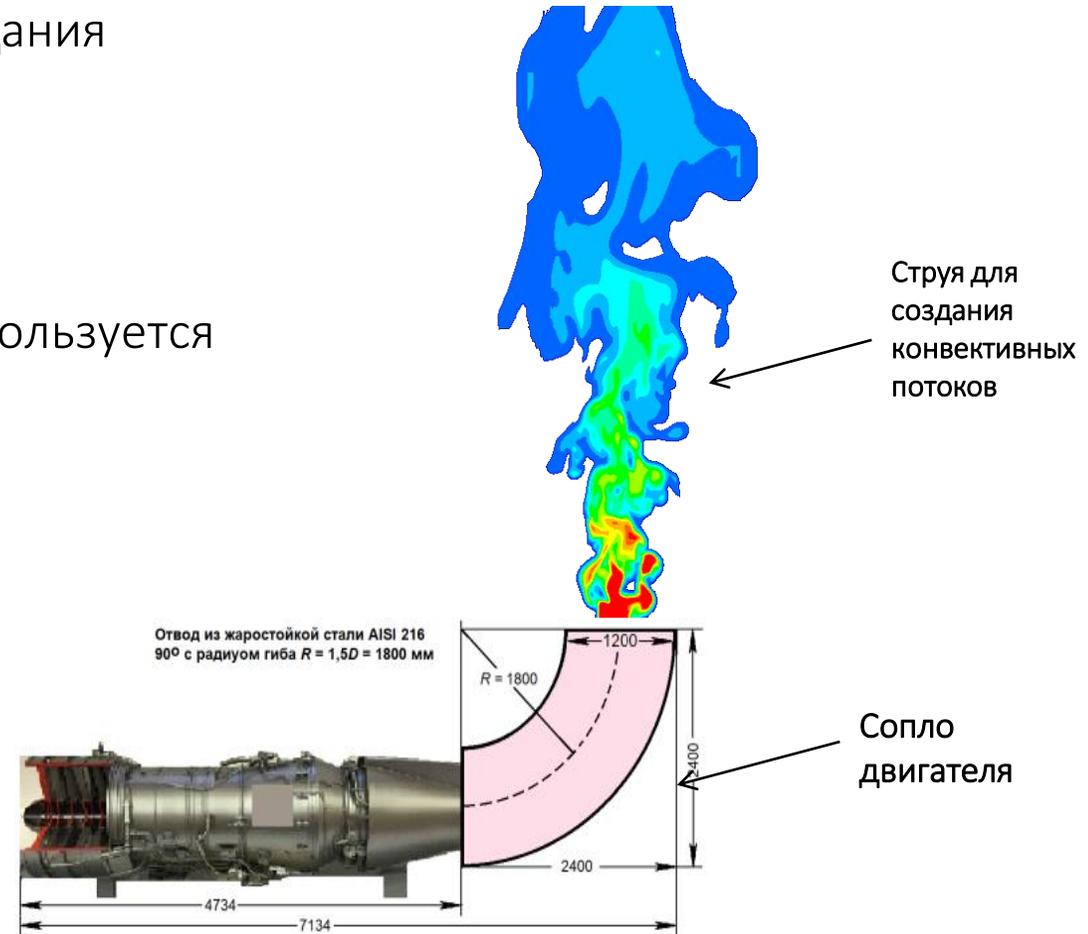
2. Сравнение картины течения горячей струи в свободной атмосфере в невысокой приземной атмосфере

Моделирование конвективных потоков в  
атмосфере, инициированных сверхзвуковой  
струей

## Описание задачи

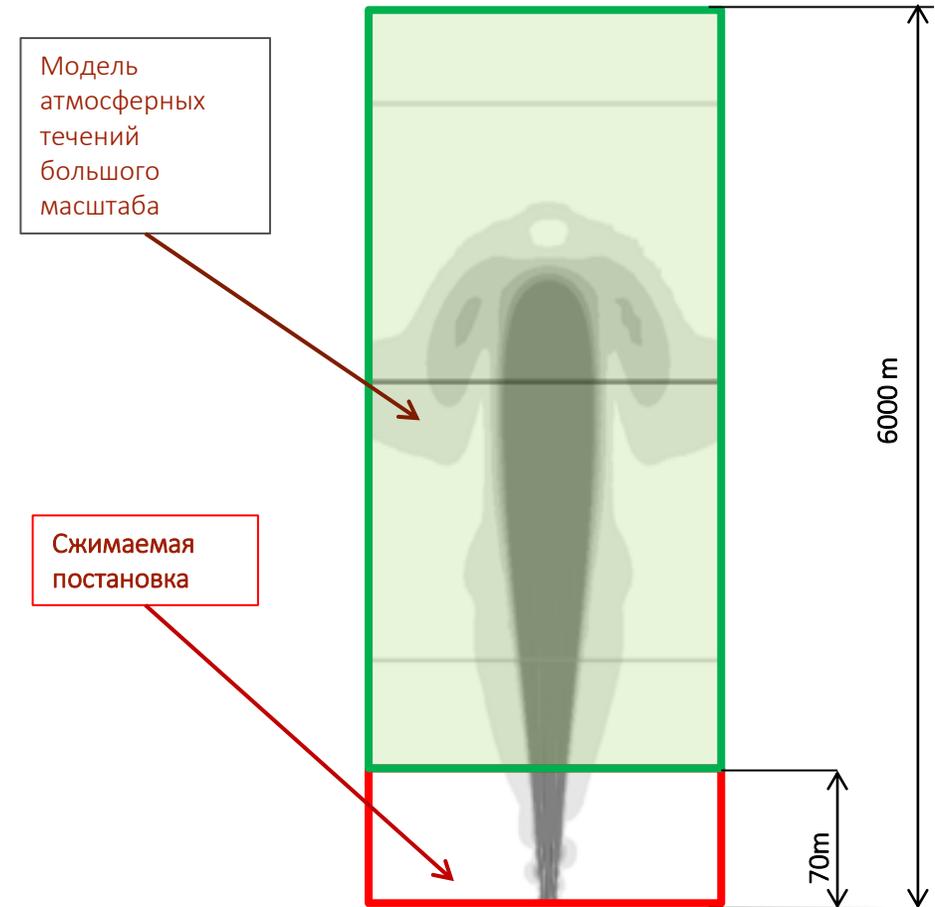
- Установка для тепловой конвекции и создания искусственных облаков создается на базе турбореактивного двигателя Д-30 III
- Для поворота реактивной струи вверх используется отвод
- Рассматривается 1 варианта отвода:
- Диаметр 1200 мм и поворот 90°

Расчет выполняется для номинального режима работы двигателя.



## Постановка задачи

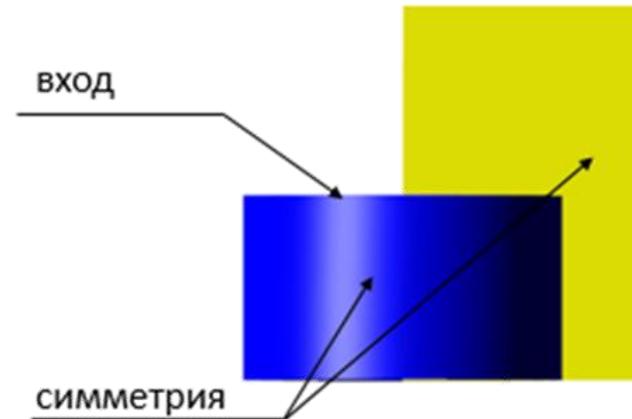
- Решение задачи разделяется на 2 постановки:
  - Сжимаемая со сверхзвуковой струей – классическая постановка для газа с плотностью, рассчитываемой по закону идеального газа, уравнение энергии – для полной энтальпии;
  - Несжимаемая – модель атмосферных течений большого масштаба.
- ГУ для несжимаемой постановки определяются в результате осреднения решения сжимаемой постановки.



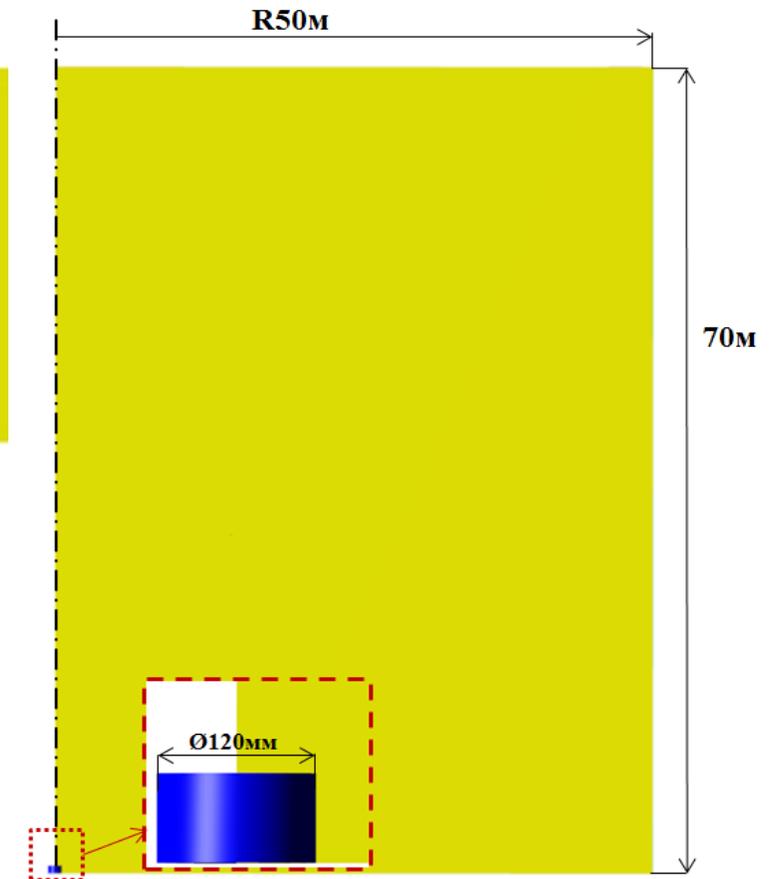
## Постановка задачи

Граничные условия входа воздуха:

- $T=450^{\circ}\text{C}$ ;
- Скорость  $W=550\text{ м/с}$ .



- Сечение расчетной сетки

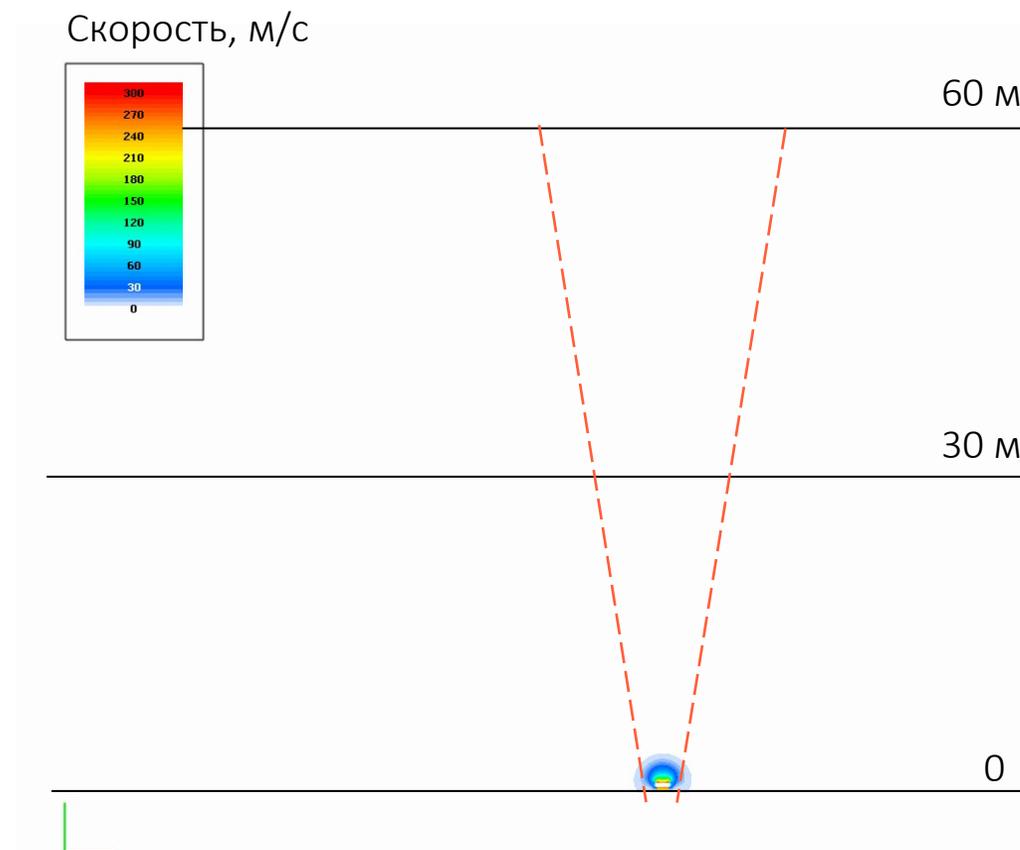
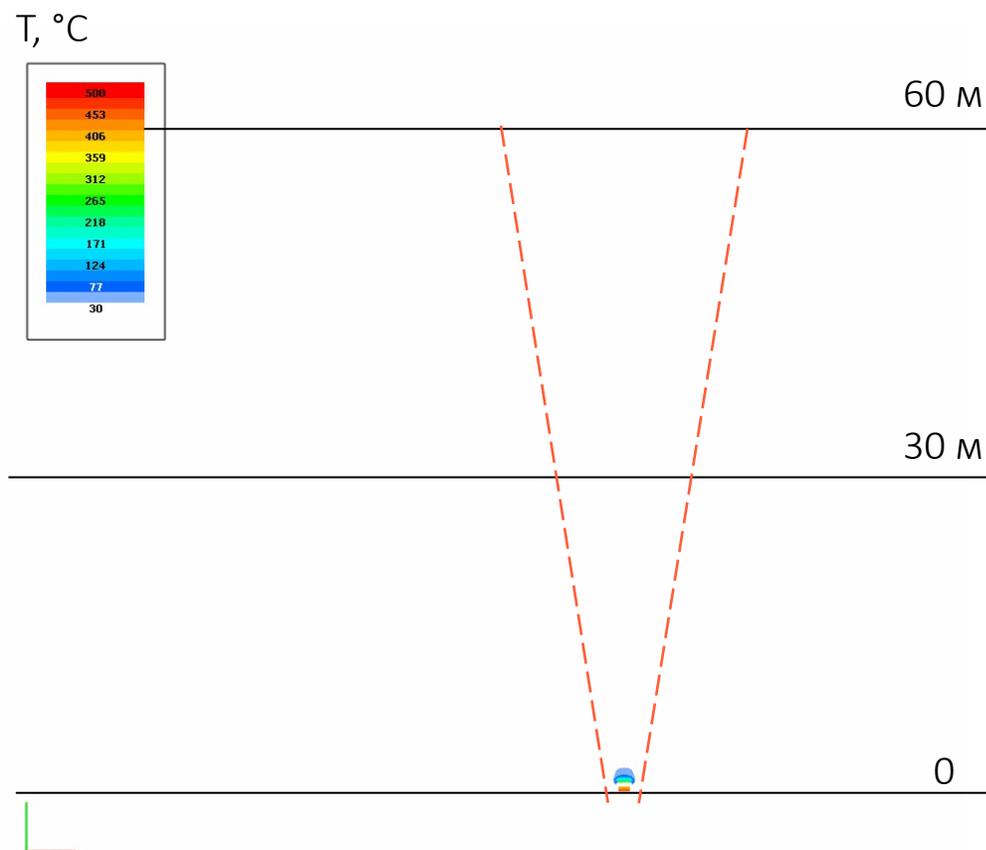


Осесимметричная постановка для безветренной атмосферы

## Результаты моделирования

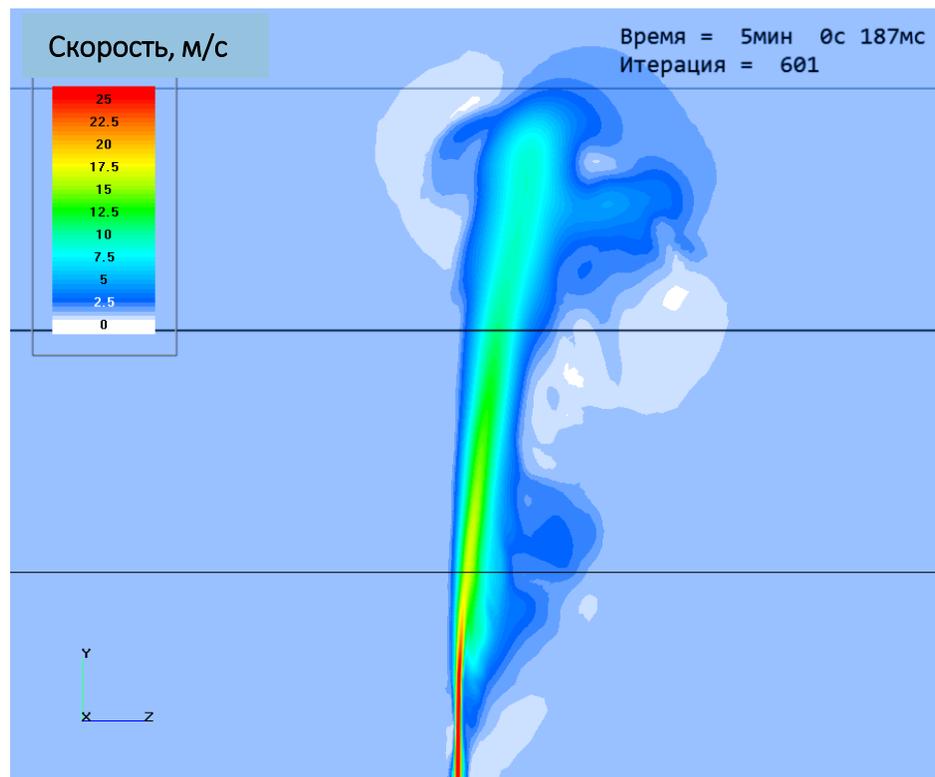
# Сжимаемая постановка – развитие струи

Расширение струи :



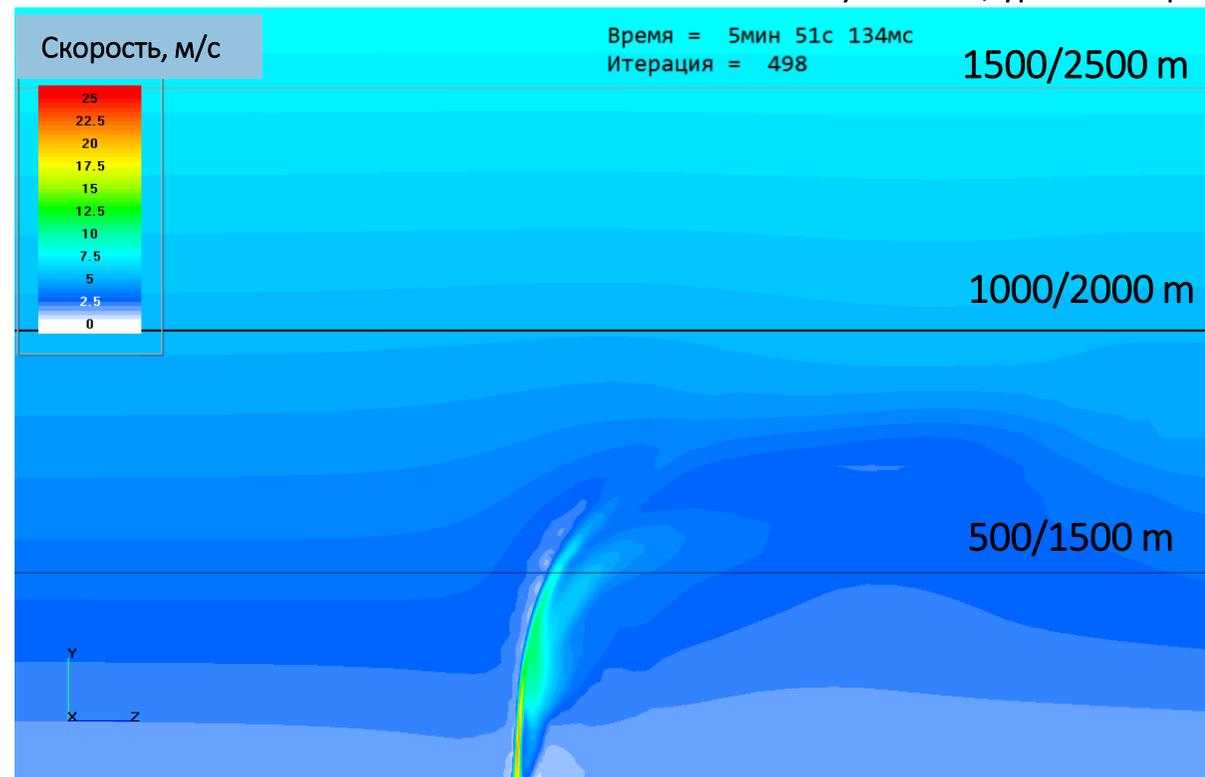
# Влияние реального профиля ветра на развитие струи

Скорость постоянная по высоте, 1 м/с

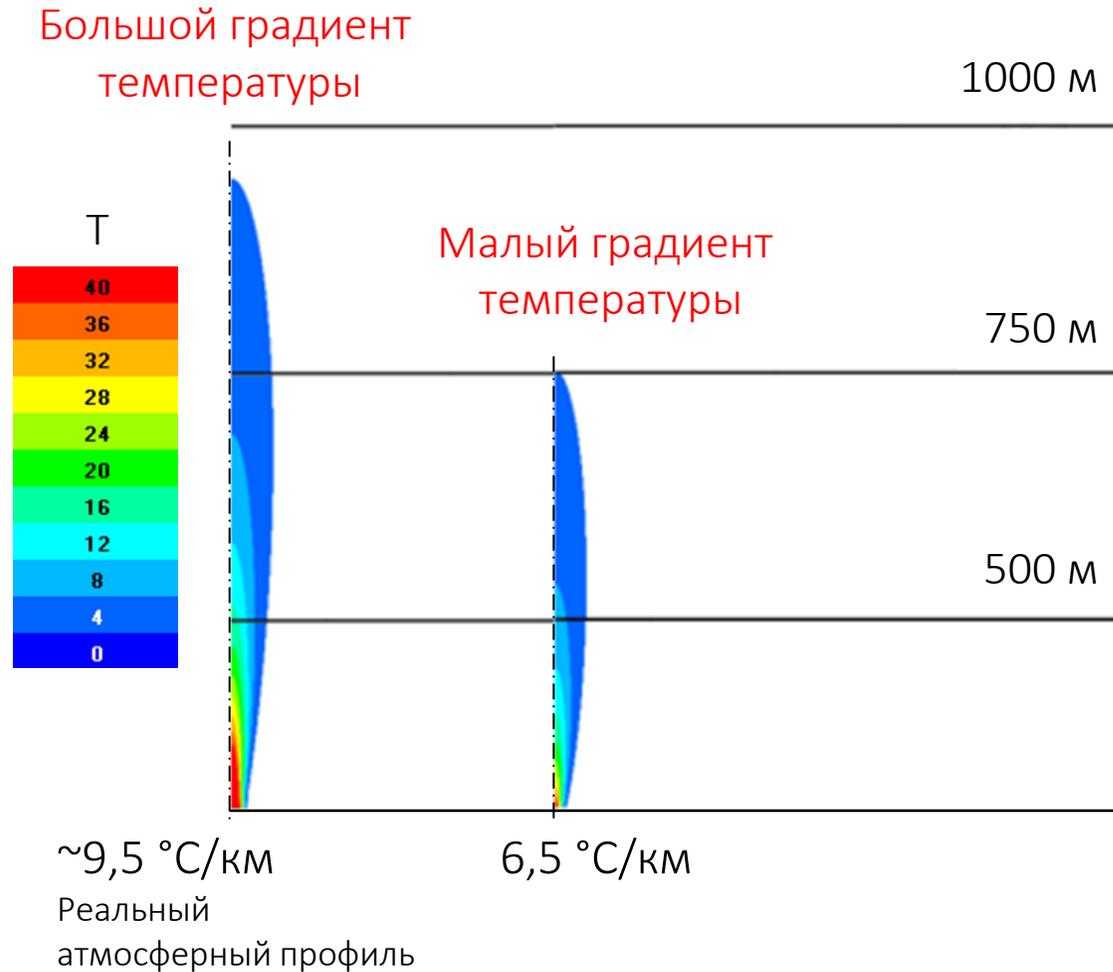


Реальный профиль скорости

Высота относительно:  
установки/ уровень моря

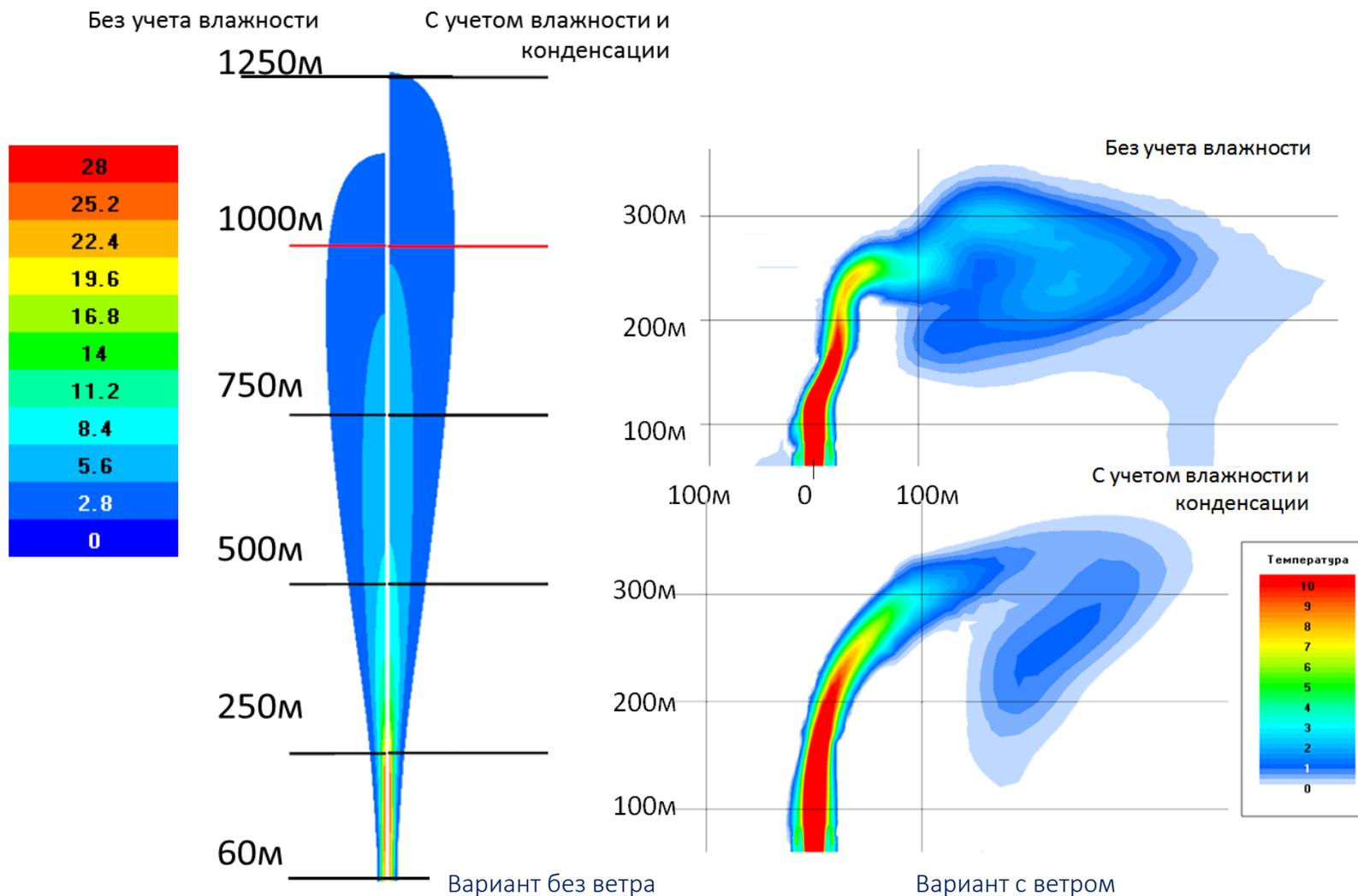


# Модель атмосферных течений большого масштаба



- Большой градиент приводит к увеличению разности температур и, как следствие, большей подъемной силы.
- Большой градиент температуры в атмосфере способствует существенному увеличению высоты струи

# Расчет с учетом влажности и конденсации пара в воздухе



- В безветренной атмосфере высота термика по профилю скорости выше для влажной атмосфера на 100-500 м (~9-25% от высоты подъема струи)
- В атмосфере с умеренным ветром высота струи с учетом влажности выше ~50 м (~20% от высоты подъема струи)

## Выводы

---

- Разработана математическая модель распространения конвективных потоков в атмосфере, инициированных сверхзвуковой струей.
- Определена основная концепция моделирования подобного класса задач – разделение на сверхзвуковую часть (сжимаемую постановку) и модель атмосферных течений большого масштаба в верхних слоях.
- Проведены численные эксперименты множества расчетных случаев.
- Показано, что в безветренной атмосфере высота струи достигает 1км.
- Определена структура течения потоков во времени.
- Показано влияние ветра, высоты запуска установки и градиента температуры атмосферного воздуха, влажности на характеристики конвективных потоков.

Моделирование конвективных потоков в  
атмосфере, вызванных нагревом  
аэрозольного слоя

## Постановка задачи

---

- Частицы аэрозоля нагреваются от солнца и вызывают образование конвективных потоков в атмосфере.
- Задается нагрев в области в зависимости от концентрации частиц:

$$Q(C) = \sigma(C) \cdot Q_0$$

$C$  - концентрация частиц;

$Q_0$  - тепловыделение при наибольшей концентрации частиц/м<sup>2</sup>

- Время работы установки – 1 час.



# Математическая модель нагрева в слое

- Расчет количества энергии, проходящей через аэрозольный слой:

$$P = P_0 \cdot e^{-L_{opt}}$$

$P_0 = 1000 \text{ Вт/м}^2$  – удельная мощность солнечного потока,

оптическая толщина:  $L_{opt} = \gamma \cdot h$ ,

$\gamma$  – коэффициент абсорбции, 1/м;  $h$  – толщина аэрозольного слоя, м.

- Коэффициент абсорбции представляется как функция от концентрации частиц аэрозоля задается таблицей
- Массовая доля частиц:

$$C_{vol} = \rho_p \cdot \frac{4\pi r_p^3}{3} \cdot N_{vol}$$

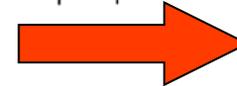
$\rho_p = 1350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность частиц;

$r_p = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  – средний радиус частиц аэрозоля.

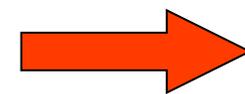
Коэффициент абсорбции

$$\gamma = \gamma(N_{vol})$$

$N_{vol}, \text{ м}^{-3}$	$\gamma, \text{ м}^{-1}$
$>6,7 \cdot 10^{11}$	0,3
$6,7 \cdot 10^{11}$	0,3
$6,7 \cdot 10^{10}$	0,03
$3,35 \cdot 10^{10}$	0,015
$6,7 \cdot 10^9$	0,003



$$\frac{\partial \rho_0 h'}{\partial t} + \nabla \rho_0 h' \mathbf{V} = \rho_0 \mathbf{V}_y \left( c_p \frac{\partial T_0}{\partial y} \left( \frac{T'}{T_0} - 1 \right) - g \right) + \nabla (\lambda_t \nabla (T' + T_0)) + Q_{vol}$$



$$Q_{vol} = P_0 \cdot \gamma(C_{vol})$$

Задается объемное тепловыделение

# Определение граничных условий

- Для входа смеси воздуха и «маркера» аэрозоля используется граничное условие с постоянной площадью:

$$S = 10^6 \text{ м}^2$$

- Температура смеси (избыточная) = 0.
- **Нормальная массовая скорость смеси:**  $\rho \cdot V$ ,

$V = 0,1 \text{ м/с}$  – скорость смеси;

$\rho = 1,14 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;

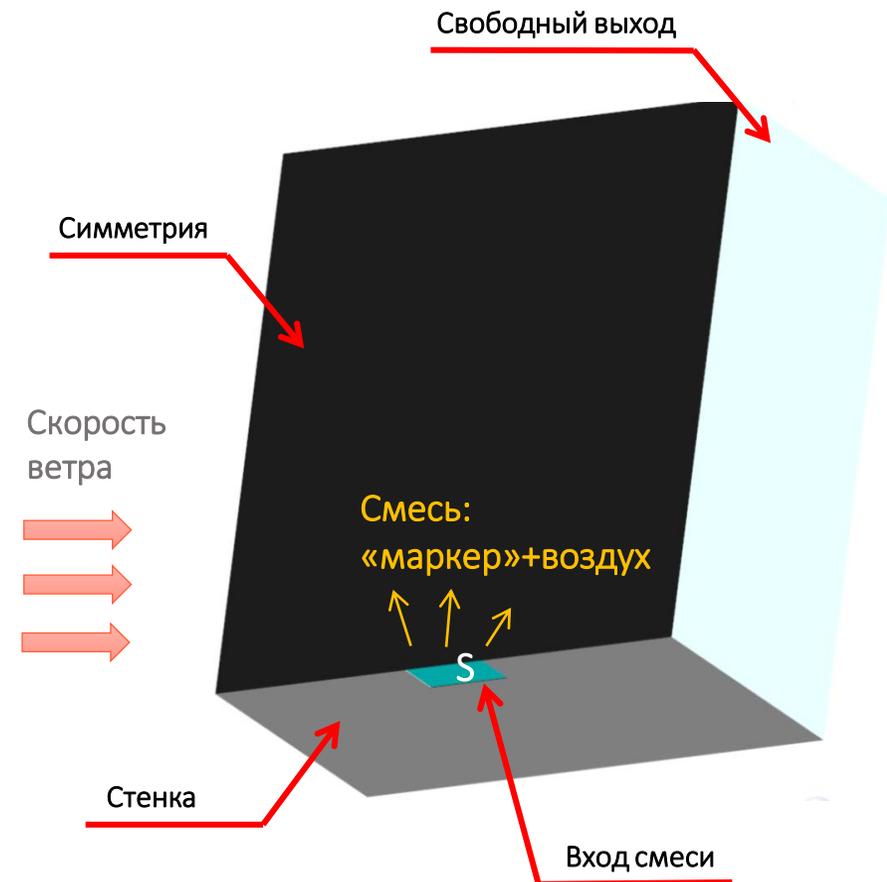
- Массовая доля «маркера» определяется:

$$C = \frac{G/S}{V \cdot \rho} = 2,19 \cdot 10^{-6}$$

- $G = 0,25 \text{ кг/с}$  – расход аэрозоля (задан);
- $V$  – скорость подачи смеси – варьируемая величина

$V = 0.003 \dots 0.1 \text{ м/с}$

Рассчитывается несколько вариантов с разными скоростями!



## Результаты моделирования

# Расчеты с уровня моря, скорость подачи смеси 0.1 м/с

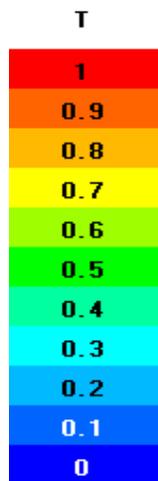
Время работы установка – 1 час

Градиент температуры в атмосфере:

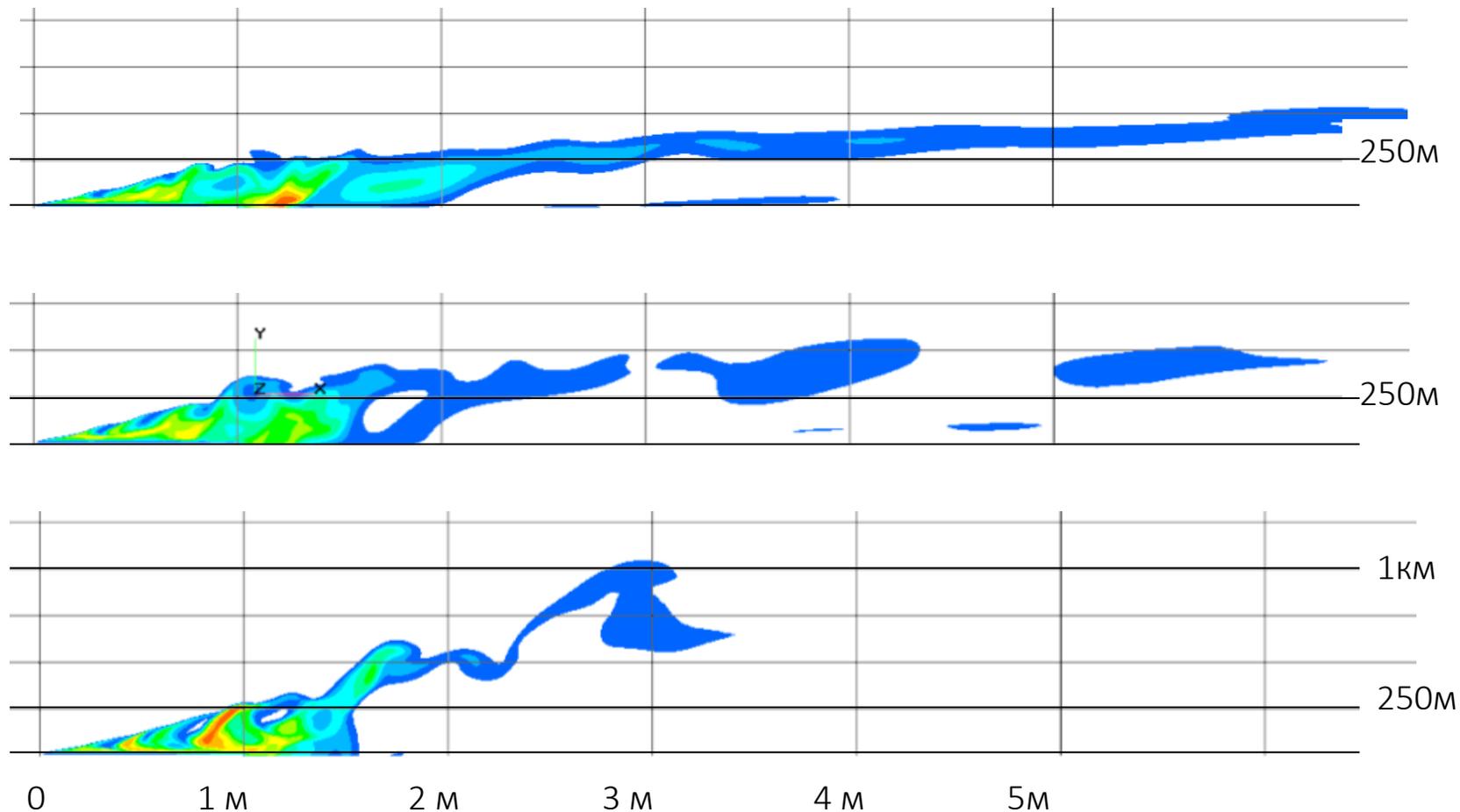
6,5 °C/км

8,0 °C/км

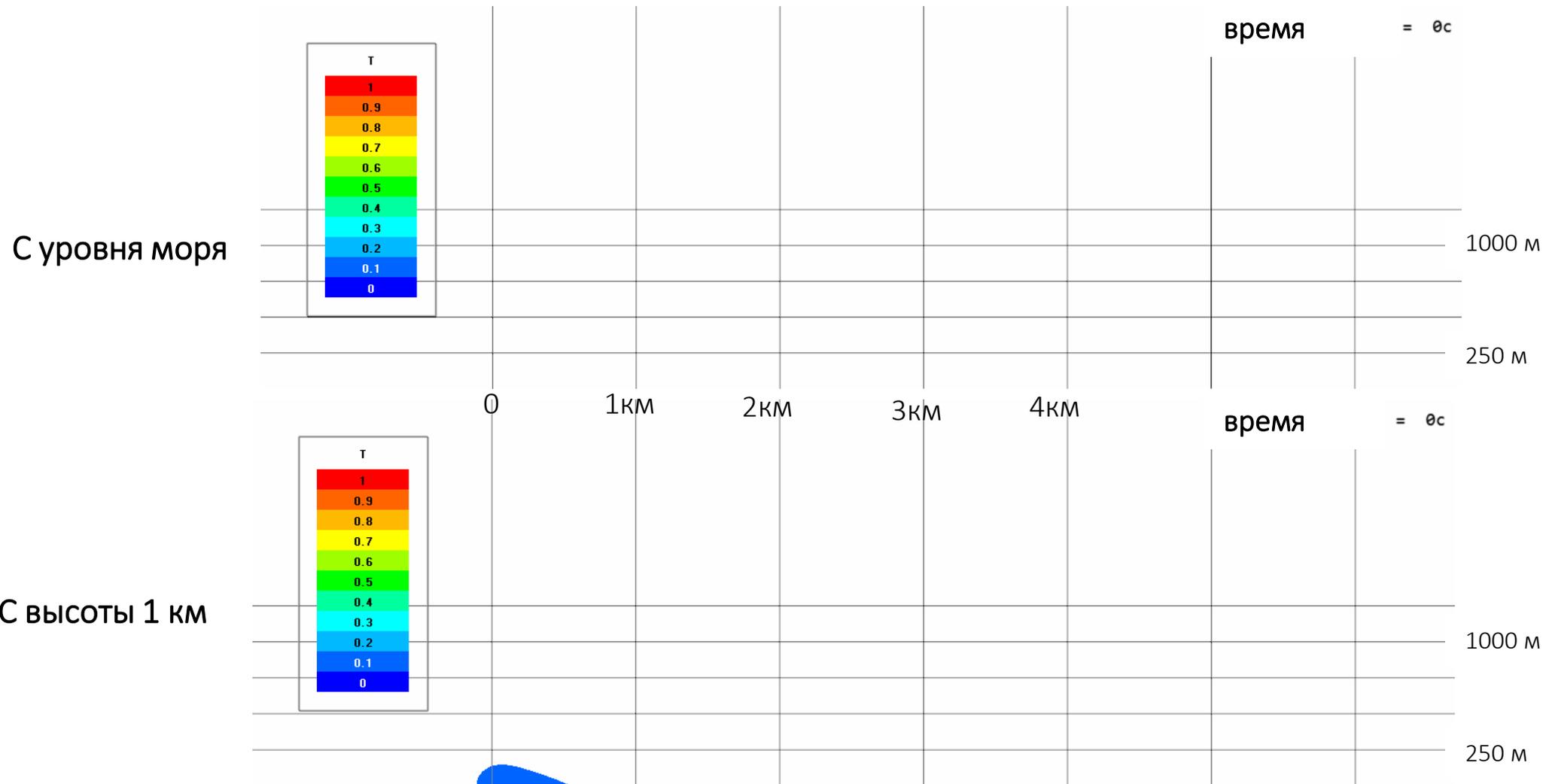
9,5 °C/км



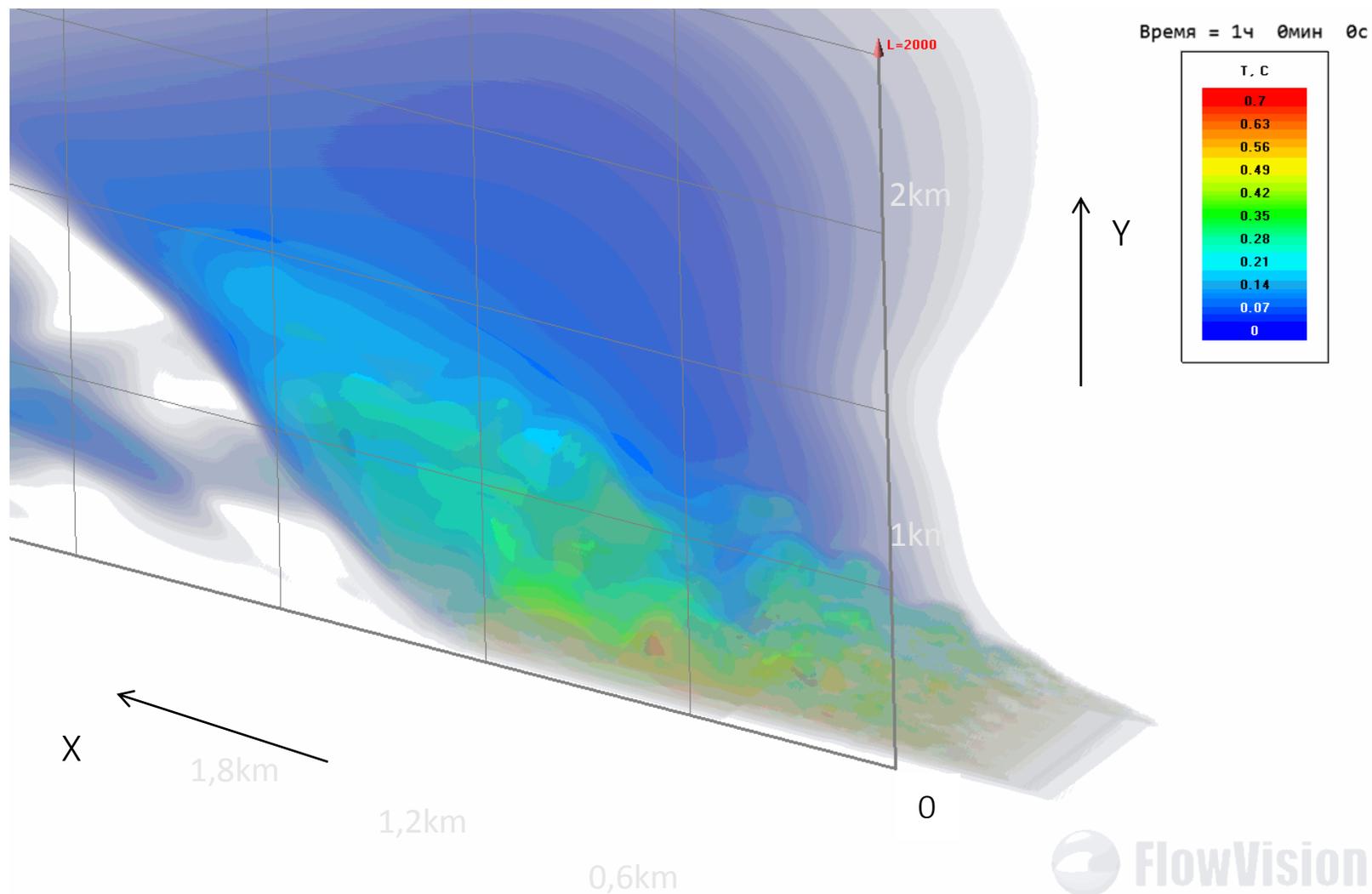
Направление скорости ветра



# Расчеты с уровня моря и с высоты 1км, скорость подачи смеси 0.1 м/с



# Расчет с ветром , скорость подачи смеси 0.1 м/с



## Выводы

---

- Разработана математическая модель распространения конвективных потоков в атмосфере, инициированных аэрозольным слоем, нагреваемым от солнечной радиации.
- Проведены численные эксперименты множества расчетных случаев.
- Определена структура течения потоков во времени.
- Показано влияние ветра, высоты запуска установки и градиента температуры атмосферного воздуха на характеристики конвективных потоков.

## Расчеты на суперкомпьютере

---

- Расчеты проведены на суперкомпьютере Tornado South Ural State University:
  - Intel Xeon X5680, 3.3 HGz, RAM 24 Gb (for the one unit);
  - Sum quantity of computing processors/cores: 480/960
- Время расчета 1 физического часа:
  - 40 миллионов расчетных ячеек
  - 72 часа=3 суток**
  - при оптимальной загрузке процессоров
- Всего рассчитано более **130** расчетных вариантов



Спасибо за внимание!