

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Выполнил: Сонько Пётр Акимович, студент 5 курс

Научный руководитель: н.с. Михальченко Е. В.



# ВВЕДЕНИЕ



Проблема пожаробезопасности в условиях космических полетов представляет собой одну из наиболее актуальных и сложных задач современной аэрокосмической инженерии.

В условиях микрогравитации поведение пламени отличается от земных условий: пламя достигает стабильного состояния с ограниченной длиной и постоянной скоростью.

Исследования в этой области имеют большое значение в разработке эффективных методов предотвращения и тушения пожаров на космических кораблях и станциях.

# ВВЕДЕНИЕ



В статье «**Flame spread: Effects of microgravity and scale** (*David L. Urban, Paul Ferkul, Sandra Olson, Gary A. Ruff, John Easton, James S. T'ien, Ya-Ting T. Liao, Chengyao Li, Carlos Fernandez-Pello, Jose L. Torero, Guillaume Legros, Christian Eigenbrod, **Nickolay Smirnov**, Osamu Fujita, Sébastien Rouvreau, Balazs Toth, Grunde Jomaas* [Combustion and Flame. 2019. Vol. 199. P. 169–182. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.10.012.](#)) авторы изучали, как пламя распространяется в условиях отсутствия гравитации.

Авторы проводили эксперименты на борту космического аппарата Sudyus, в ходе которых изучалось распространение пламени по образцам из хлопково-стекловолоконной ткани и толстого листа ПММА при различных скоростях потока воздуха (20–25 см/с).

Одной из подзадач при рассмотрении такой сложной проблемы является изучение пограничного слоя над исследуемым материалом.

# МОДЕЛЬ БЛАЗИУСА В ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧЕ

Рассматриваем изменение профиля скорости в пограничном слое над плоской пластиной и сравниваем его с теоретическим решением Блазиуса. Расчеты проводим в программе на **OpenFOAM**.

## Предположения численной задачи:

- Течение несжимаемого газа над плоской пластиной
- Течение происходит в направлении  $x$ .
- Газ имеет скорость  $U$  (вне пограничного слоя).

## Основные уравнения:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

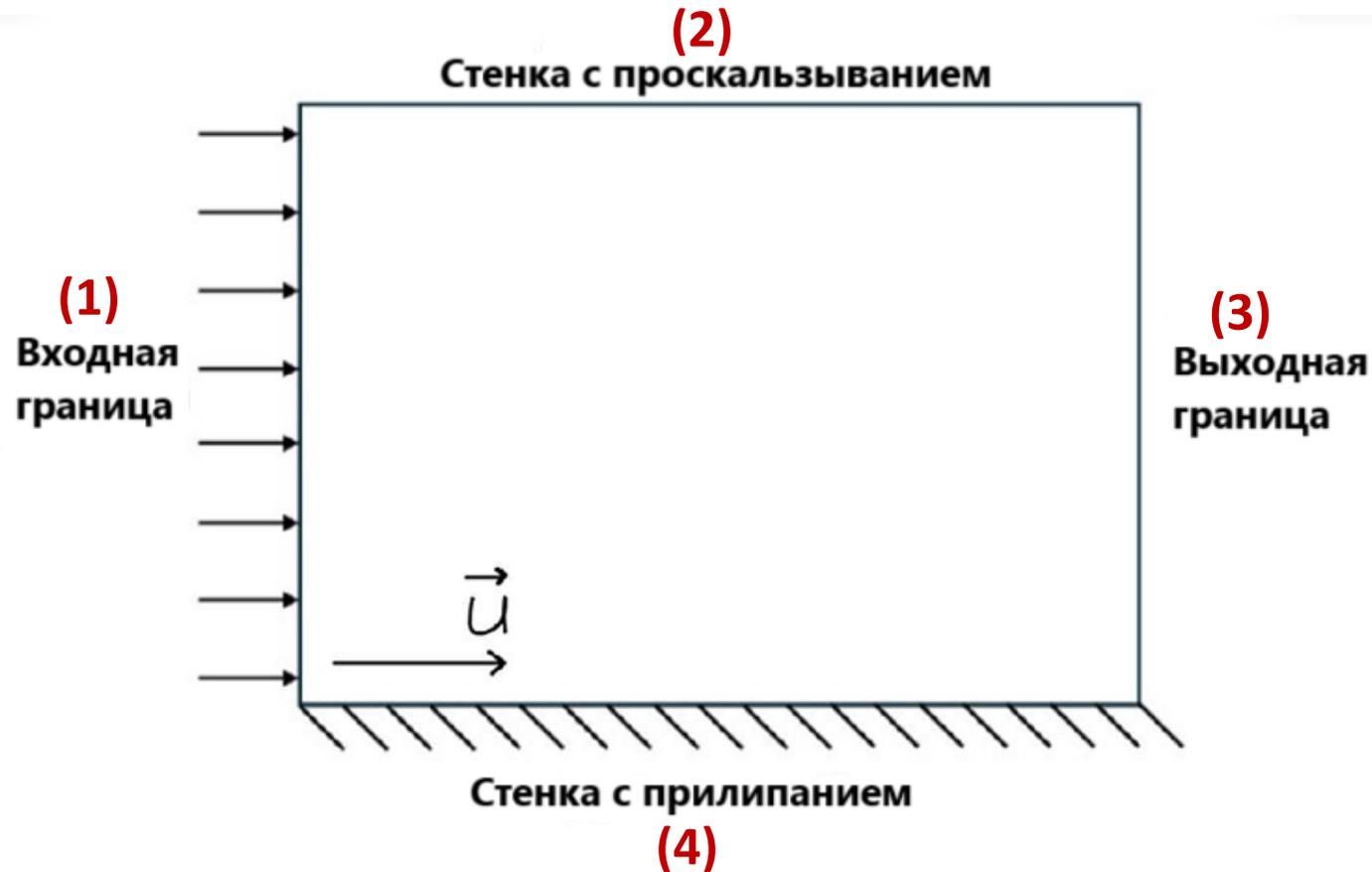
– Уравнение пограничного слоя

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}}$$

– Толщина пограничного слоя (**Расстояние от поверхности пластины, где скорость достигает 99% скорости набегающего потока  $U$** )

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Рассматриваем двумерную задачу



Условия на границах:

1)  $u = U, v = 0$

2)  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0$

3)  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$

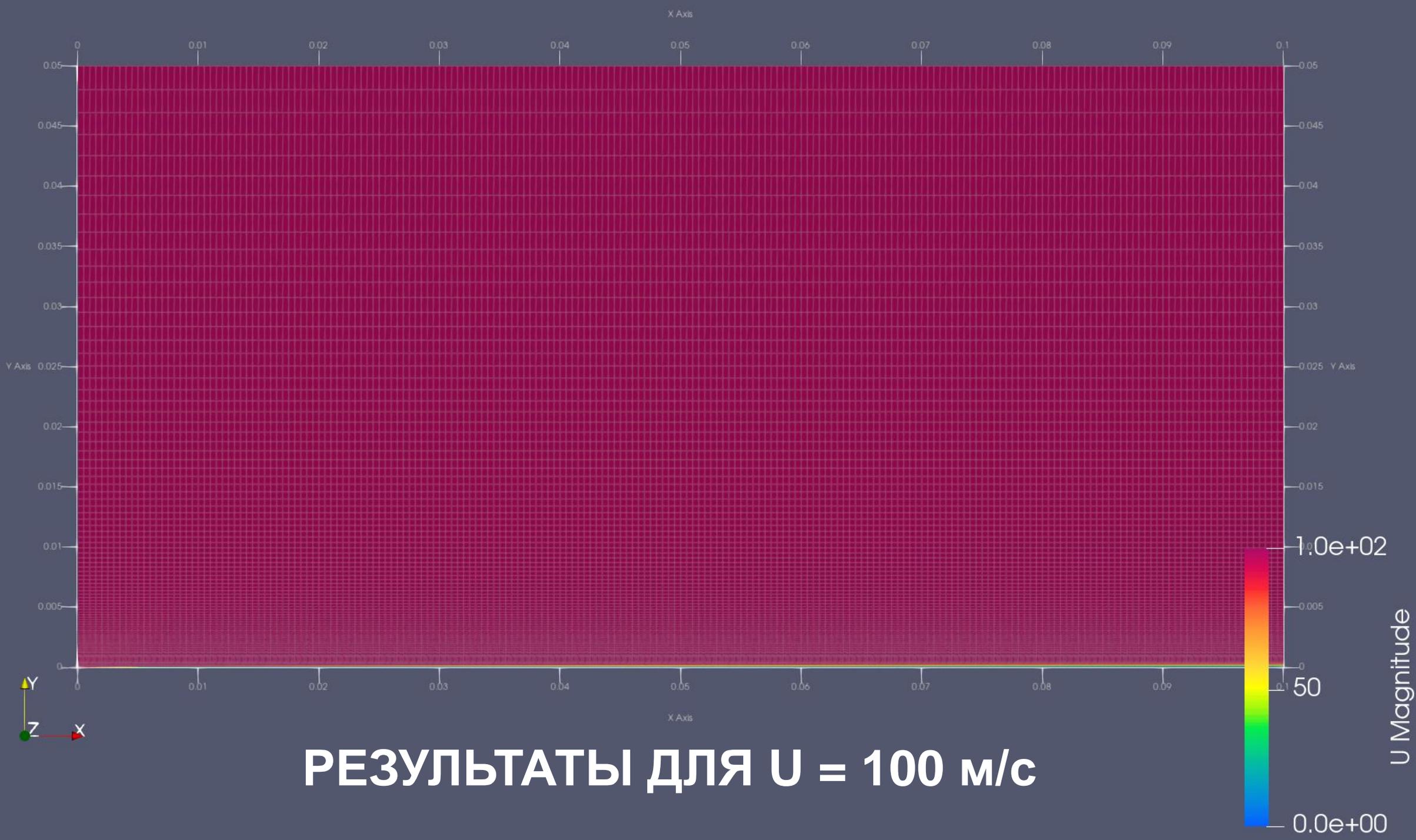
4)  $u = 0, v = 0$

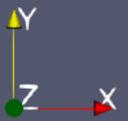
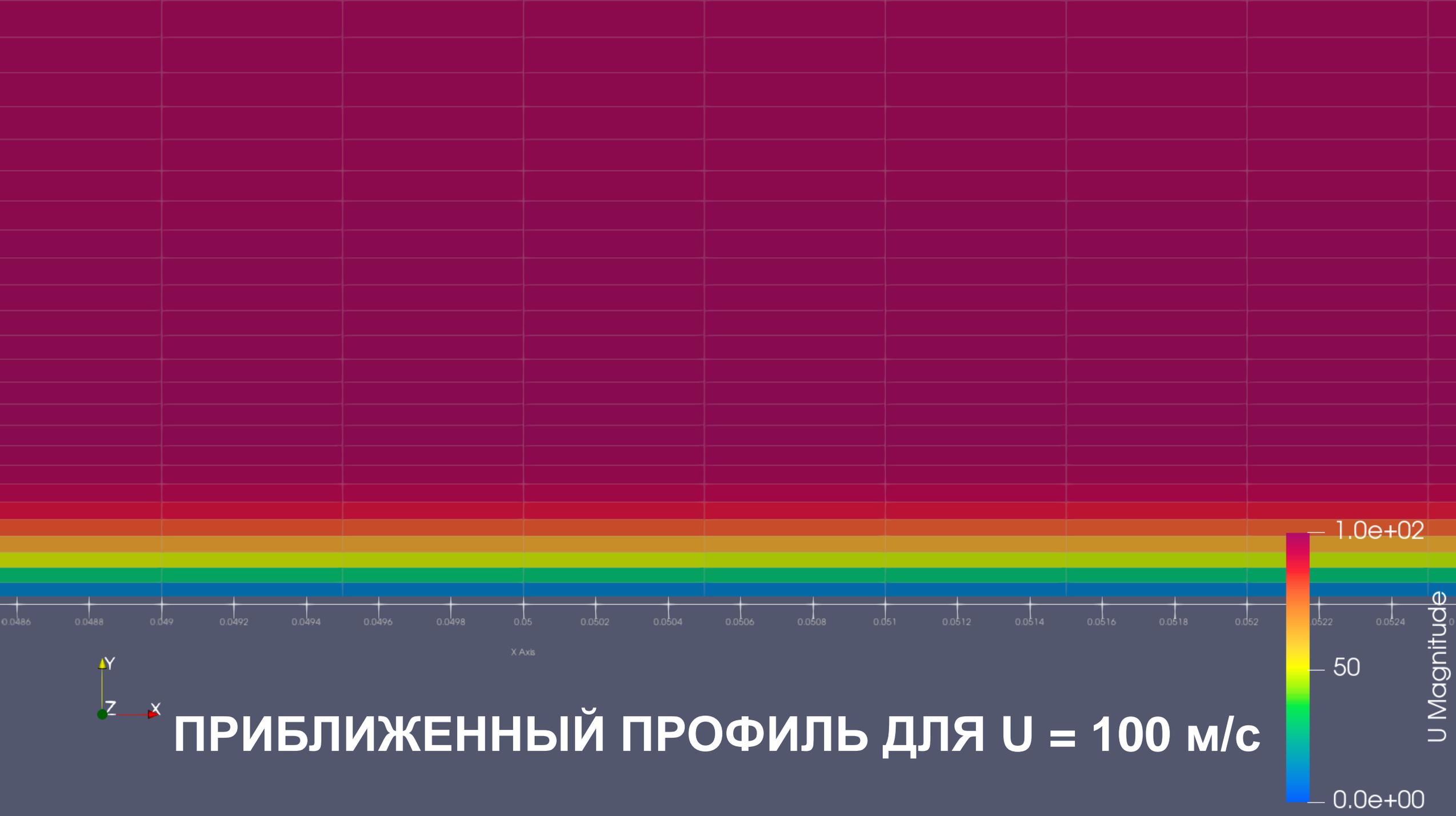
# ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СКОРОСТЕЙ

$$U = 100 \text{ м/с}, U = 150 \text{ м/с}, U = 200 \text{ м/с}$$

## Входные данные:

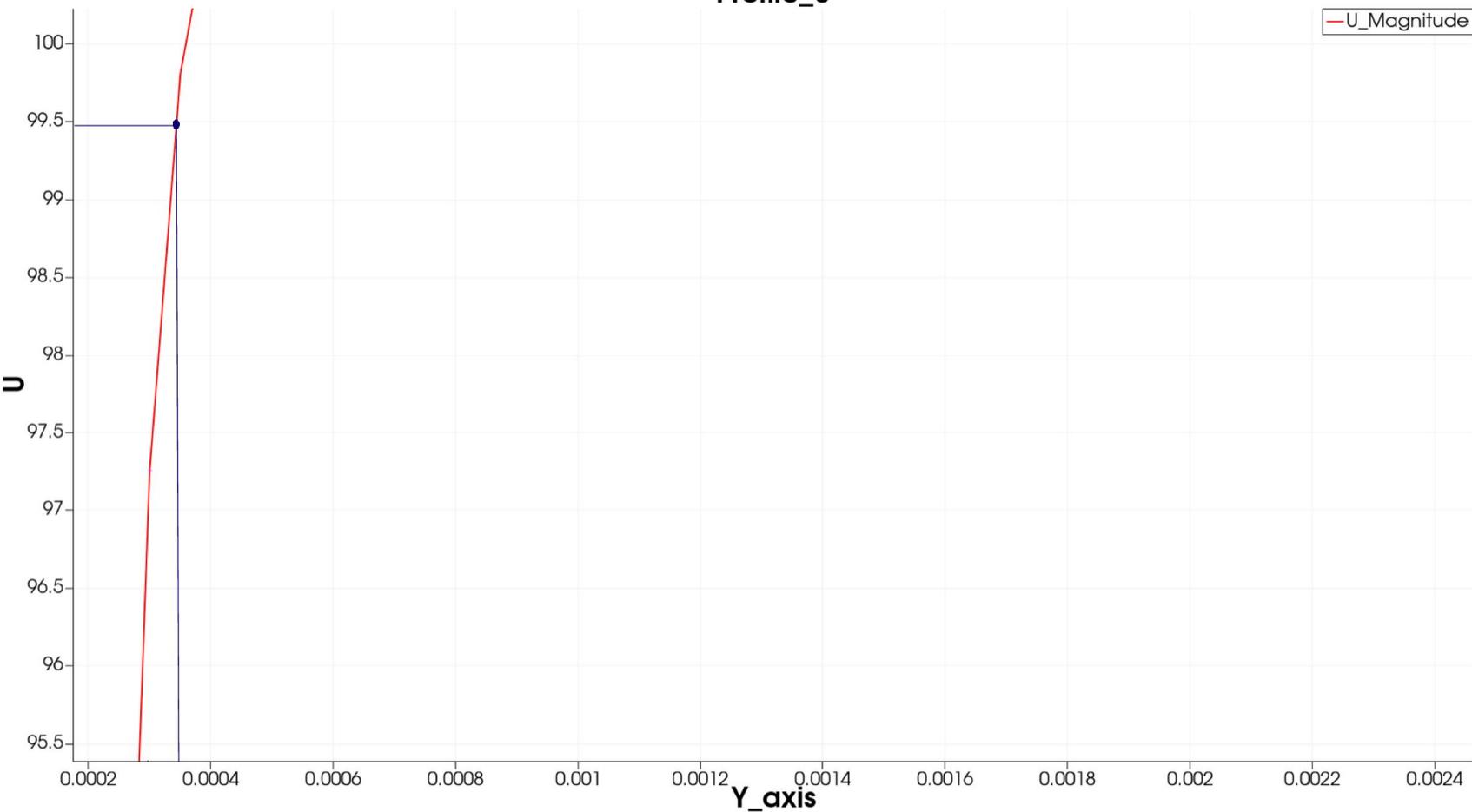
- кинематическая вязкость:  $\nu = 1 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$
- расчетная область:  $0.1 \times 0.05 \text{ м}$
- расчетная сетка (200, 100, 1), градиентное уплотнение (1, 50, 1)
- результат в момент времени 5 секунд в точке  $x = 0.05 \text{ м}$





**ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ  $U = 100$  м/с**

Profile\_U



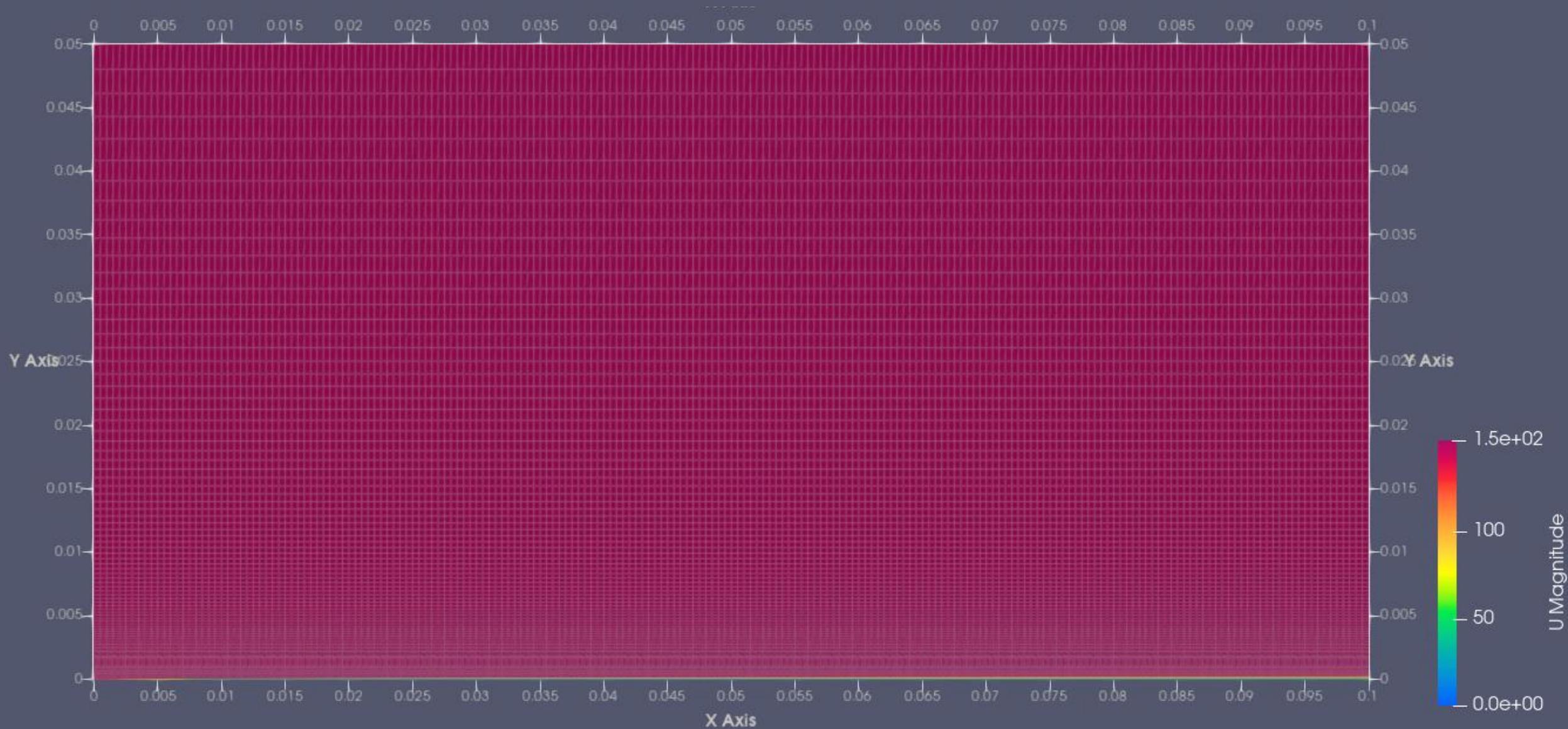
На численно полученном графике видим значение скорости

Получим значение координаты  $y$  из формулы и сверим с графиком

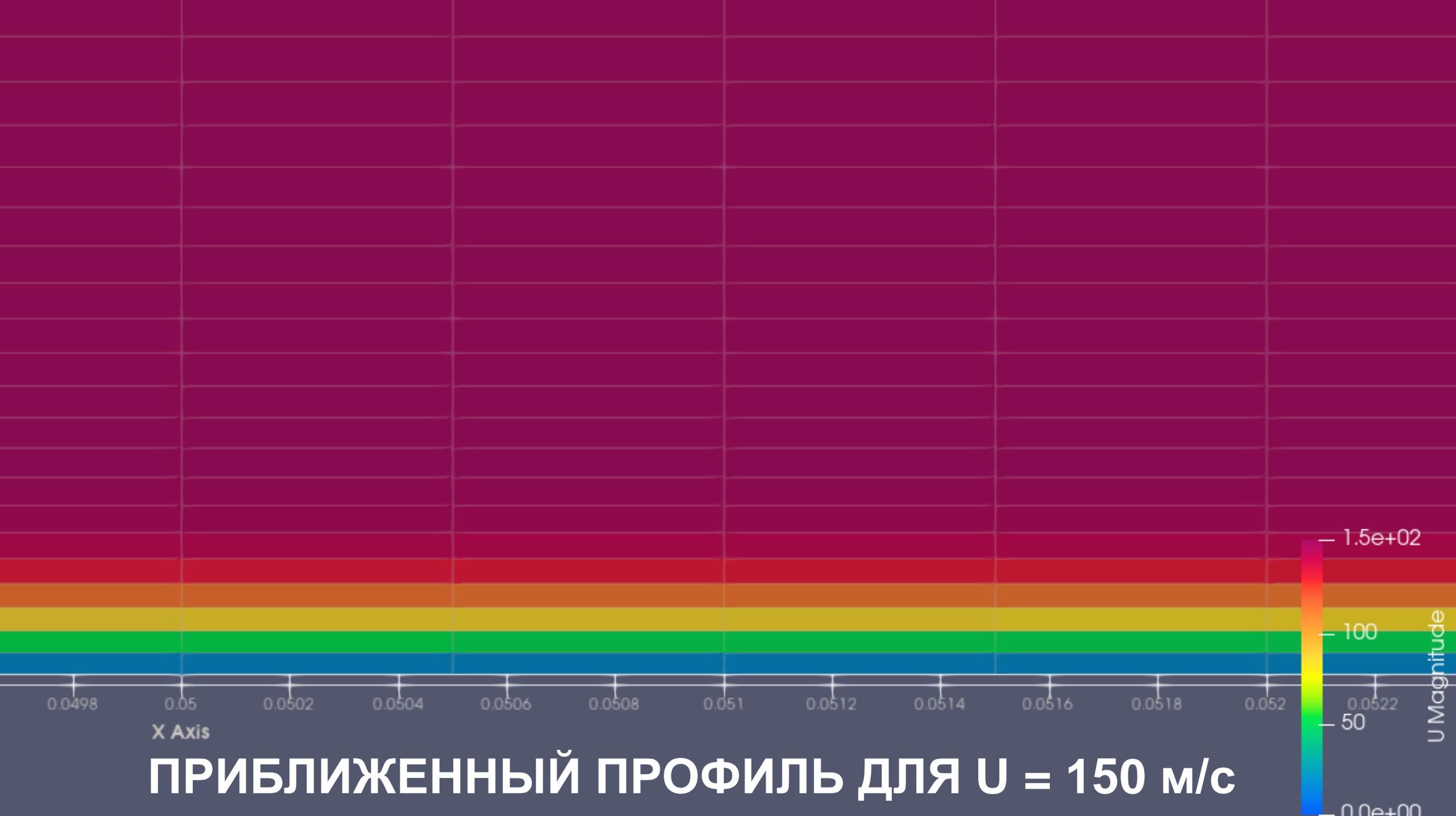
**Толщина пограничного слоя полученная теоретически:**

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}} = 5.0 \sqrt{\frac{10^{-5} \times 0.05}{100}} = 0.00035$$

На полученном численно профиле скорости в точке  $y = 0.00035$  м. скорость  $U \approx 99$  м/с

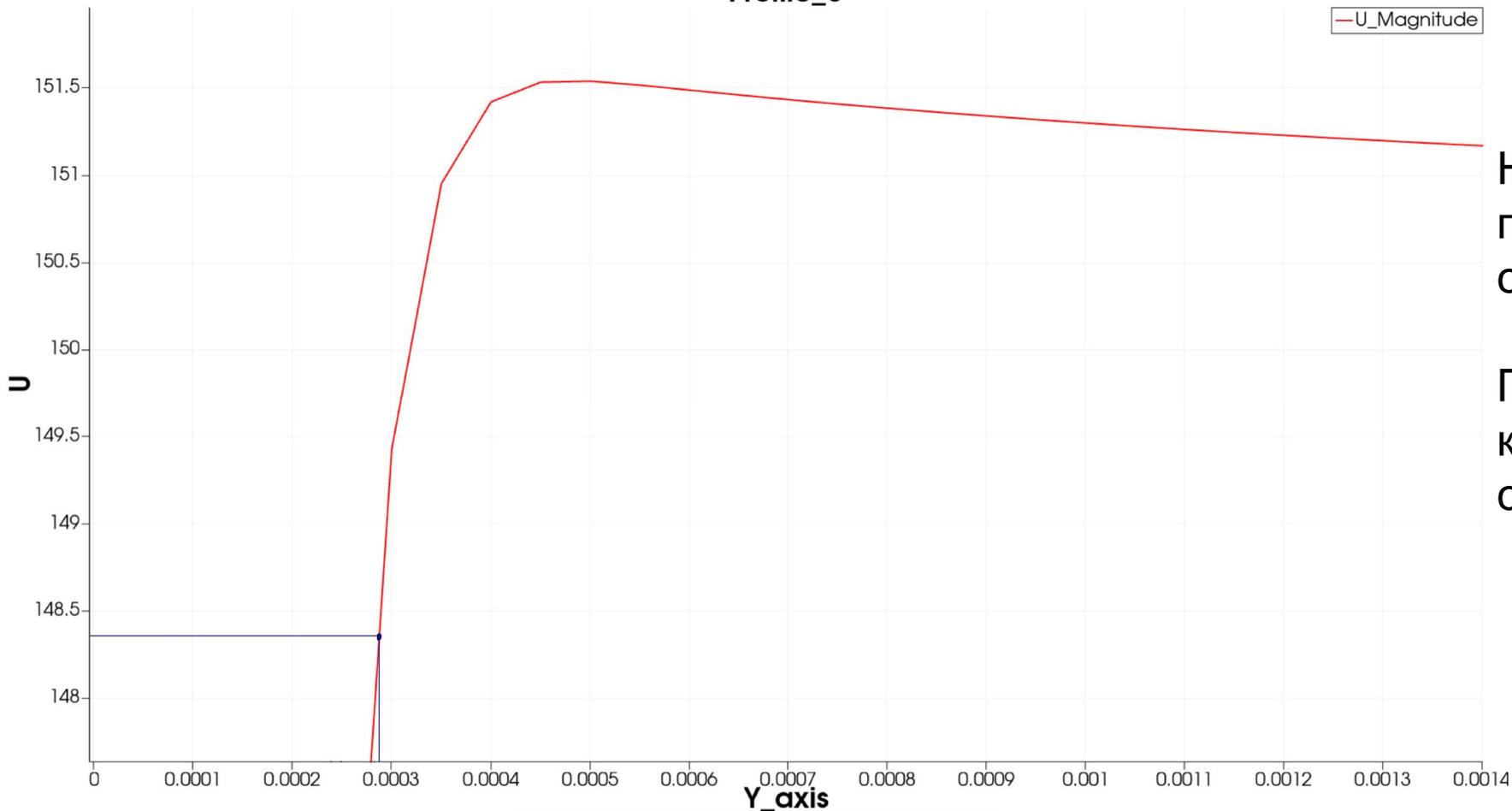


**РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ  $U = 150$  м/с**



**ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ  $U = 150$  м/с**

Profile\_U



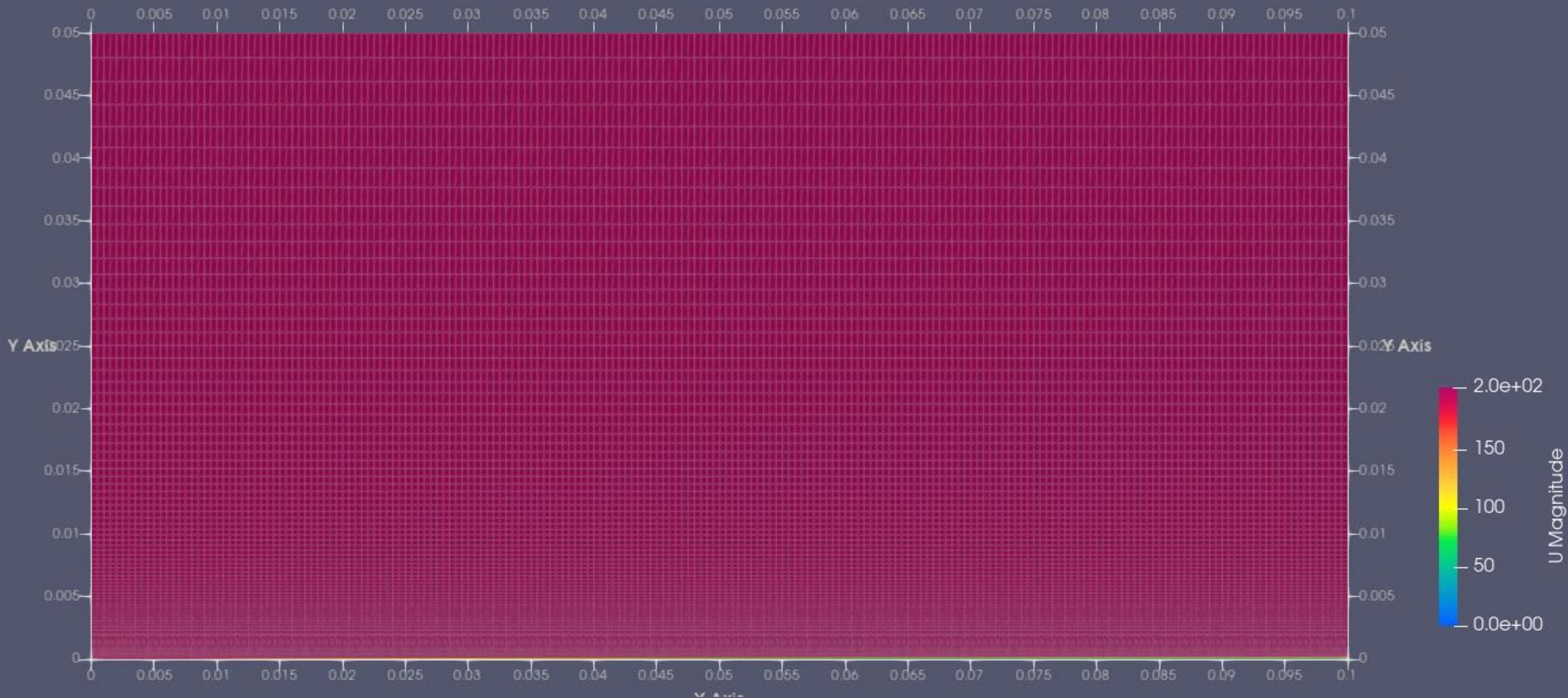
На численно полученном графике видим значение скорости

Получим значение координаты  $y$  из формулы и сверим с графиком

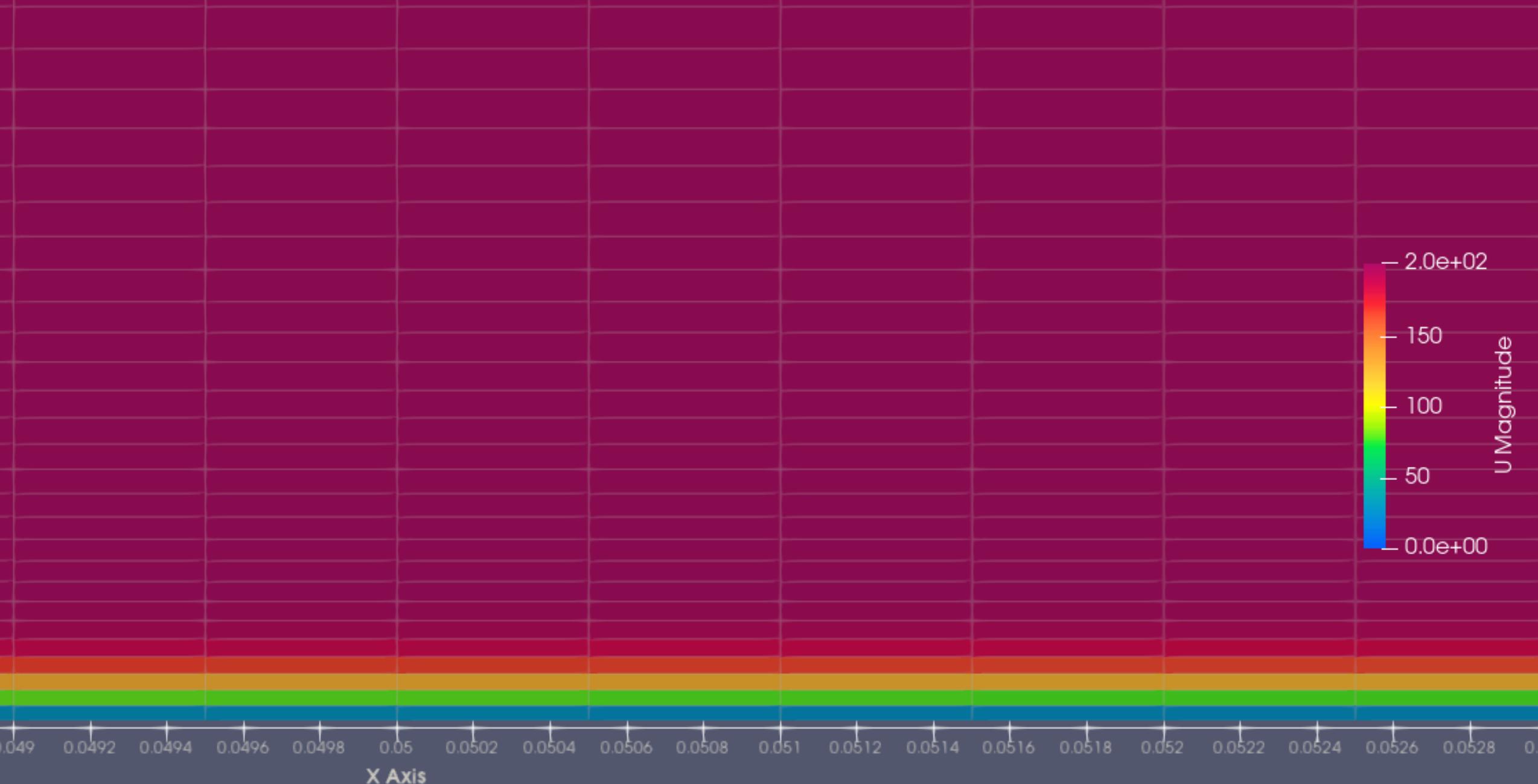
**Толщина пограничного слоя полученная теоретически:**

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}} = 5.0 \sqrt{\frac{10^{-5} \times 0.05}{150}} = 0.00028$$

На полученном численно профиле скорости в точке  $y = 0.00028$  м. **скорость  $U \approx 148$  м/с**



**РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ  $U = 200$  м/с**



**ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ  $U = 200$  м/с**



На численно полученном графике видим значение скорости

Получим значение координаты  $u$  из формулы и сверим с графиком

**Толщина пограничного слоя полученная теоретически:**

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}} = 5.0 \sqrt{\frac{10^{-5} \times 0.05}{200}} = 0.00025$$

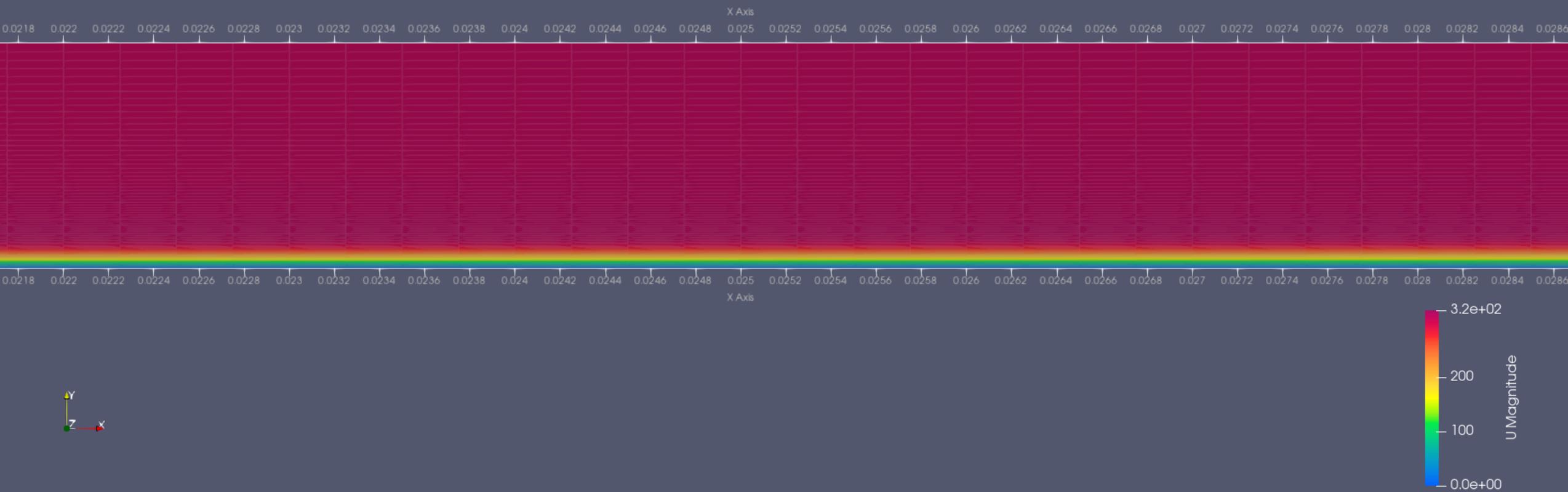
На полученном численно профиле скорости в точке  $y = 0.00025$  м. **скорость  $U \approx 197$  м/с**

# ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СКОРОСТИ

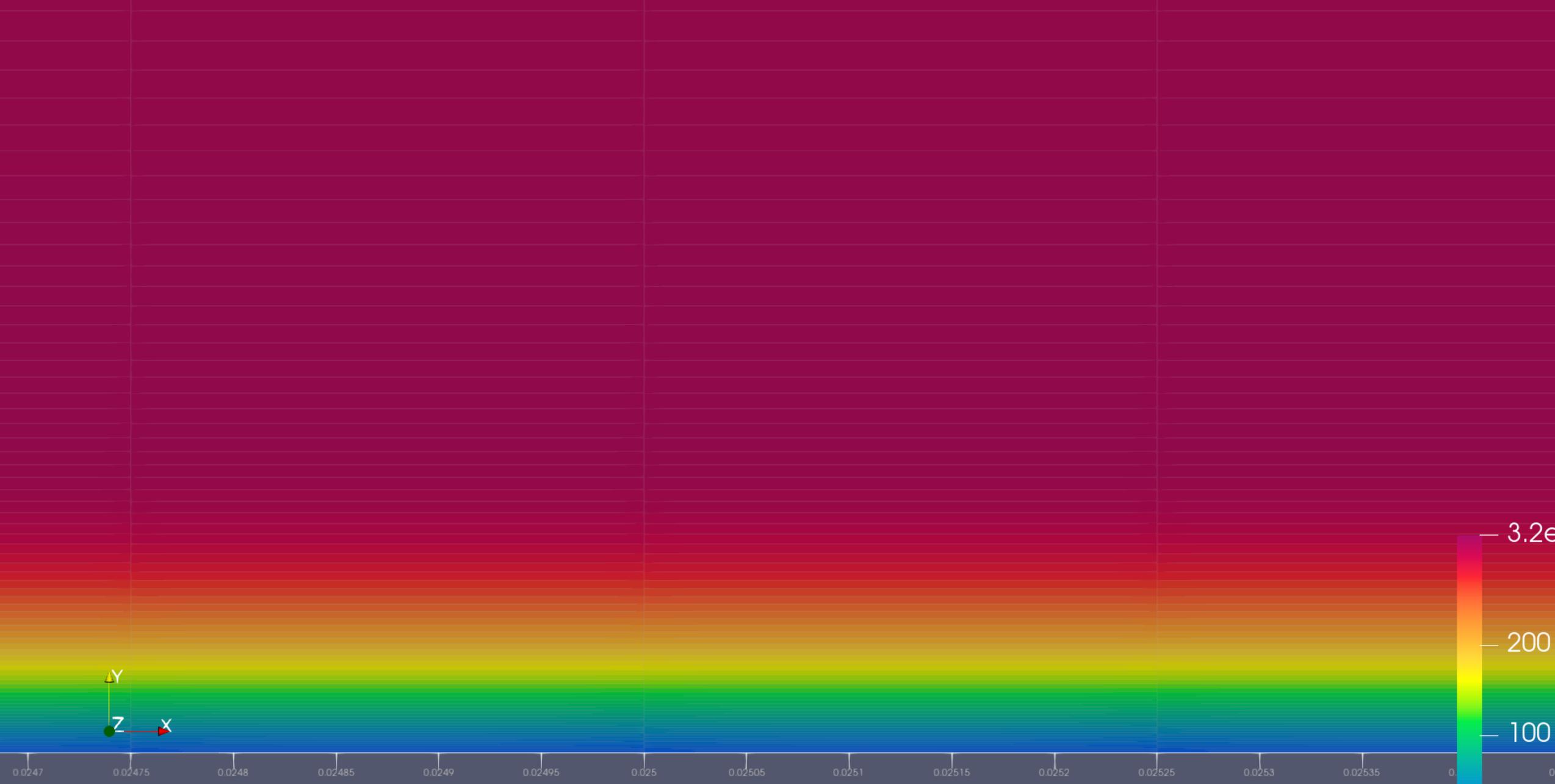
**U = 300 м/с**

## **Входные данные:**

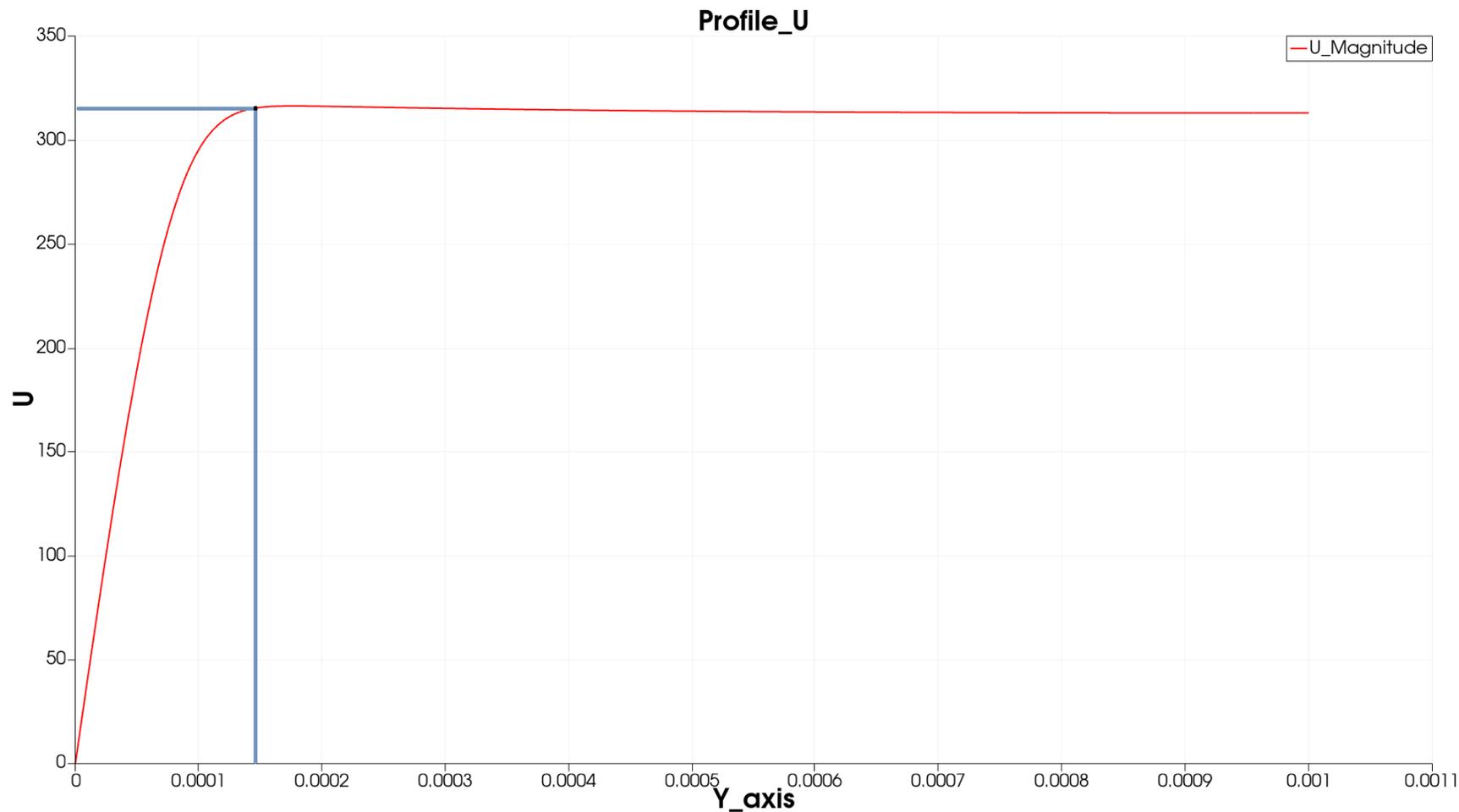
- кинематическая вязкость:  $\nu = 1 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$
- расчетная область:  $0.1 \times 0.05 \text{ м}$
- расчетная сетка (200, 100, 1), градиентное уплотнение (1, 50, 1)
- результат в момент времени 5 секунд в точке  $x = 0.025 \text{ м}$



**РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ  $U = 300$  м/с**



**ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ  $U = 300$  м/с**



На численно полученном графике видим значение скорости

Получим значение координаты  $y$  из формулы и сверим с графиком

**Толщина пограничного слоя полученная теоретически:**

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}} = 5.0 \sqrt{\frac{10^{-5} \times 0.025}{300}} = 0.00014$$

На полученном численно профиле скорости в точке  $y = 0.00014$  м. **скорость  $U \approx 314$  м/с**

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩУЮ РАБОТУ



В результате проделанной работы было проведено тестирование возможностей инструментария OpenFOAM и выполнена подготовка к дальнейшему усложнению модели.

## **Усложнение модели:**

- Учет теплопроводности в пластине.
- Учет процесса пиролиза и выделения газа.
- Учет химической кинетики окисления летучих продуктов пиролиза.
- Исследование распространения пламени по поверхности.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**