



# **Валидационные расчеты задач гемодинамики с использованием программного комплекса FlowVision в режиме распараллеливания**

Конференция «Суперкомпьютерные дни в России»

Докладчик: Калугина Мария Денисовна

2022 г.

Задачи вычислительной гемодинамики приобрели значительный интерес в связи с возможностью перейти к созданию пациент-ориентированных (персонализированных) математических моделей кровообращения и создания искусственных органов.

Возросшее число работ по вычислительной гемодинамике выдвигает требования к возможностям программных комплексов. Эти требования существенны и для исследовательских проектов, и для задач проектирования новых устройств или препаратов. Для оценки точности и производительности программного обеспечения в настоящее время используются задачи, предложенные американской Food and Drug Administration (FDA).

**Организатор исследования:** Food and Drug Administration

**Цель исследования:** изучить методологию моделирования течения жидкости в идеализированном медицинском устройстве для переноса крови



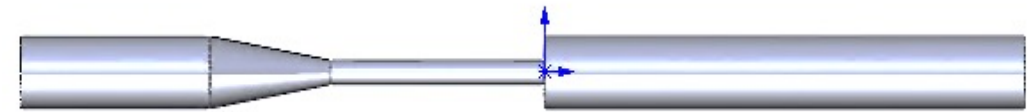
Программный комплекс вычислительной аэро- и гидродинамики FlowVision предназначен для проведения математического моделирования различных физических процессов.

- 1) Аппроксимация основных уравнений движения жидкости в форме Навье-Стокса в ПК основана на конечно-объемном подходе.
- 2) Расчетная сетка во FlowVision является декартовой, ячейки сетки представляют собой гексаэдры. Во FlowVision имеется автоматический построитель неструктурированной сетки с возможностью ее локальной адаптации до указанного уровня на любой поверхности и в любом объеме расчетной области.
- 3) Для моделирования характеристик пограничного слоя на стенке в функционал ПК заложены пристеночные функции, позволяющие пользователю без подробного разрешения пространства расчетной сеткой, получать достаточно точные результаты.
- 4) Для учета турбулентности течения во FlowVision реализовано 7 моделей турбулентности, которые можно использовать в низко- и высокорейнольдсовых расчетах.

## Начальная геометрия



## Модель в SolidWorks



## Проект во FlowVision

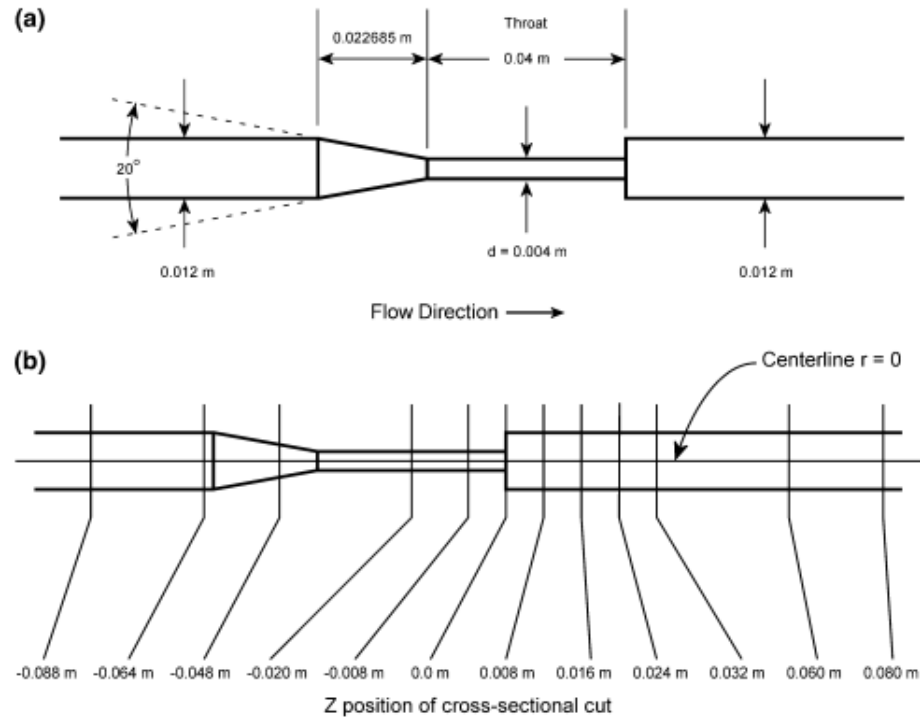
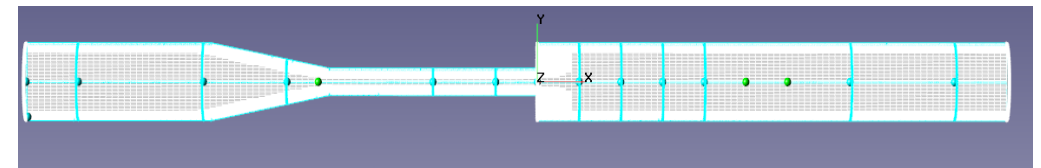
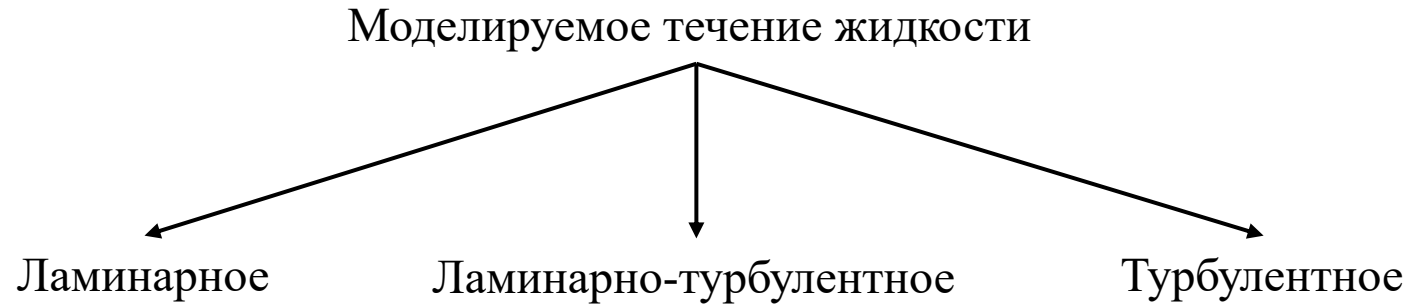
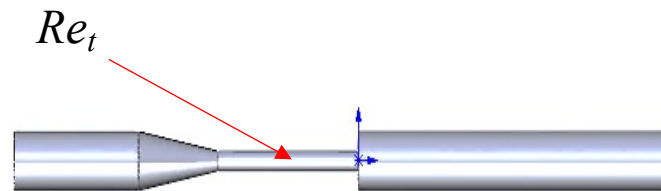


FIGURE 1. Nozzle specifications: (a) dimensions of nozzle (inlet and outlet lengths unspecified); (b) cross-sectional cuts defined for data submission for the sudden expansion.



$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$Re_t$	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	$\mu, \text{ Нс}/\text{м}^3$
$5,21 \cdot 10^{-6}$	500	1056	0,0035
$2,08 \cdot 10^{-5}$	2000		
$3,64 \cdot 10^{-5}$	3500		
$6,77 \cdot 10^{-5}$	6500		



## Вход:

Параболический профиль скорости

$$U_z(r) = 2\bar{U}_z \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

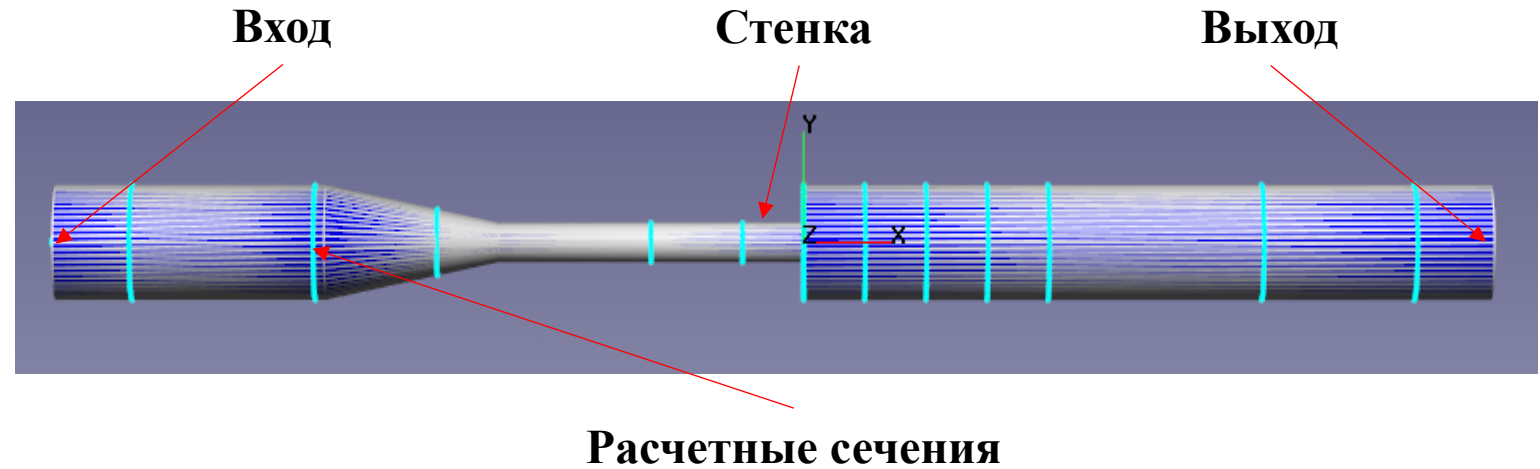
$$\bar{U}_z = Q_{inlet}/A_{inlet}, \quad A_{inlet} = \pi r_{inlet}^2$$

## Выход:

Нулевое давление

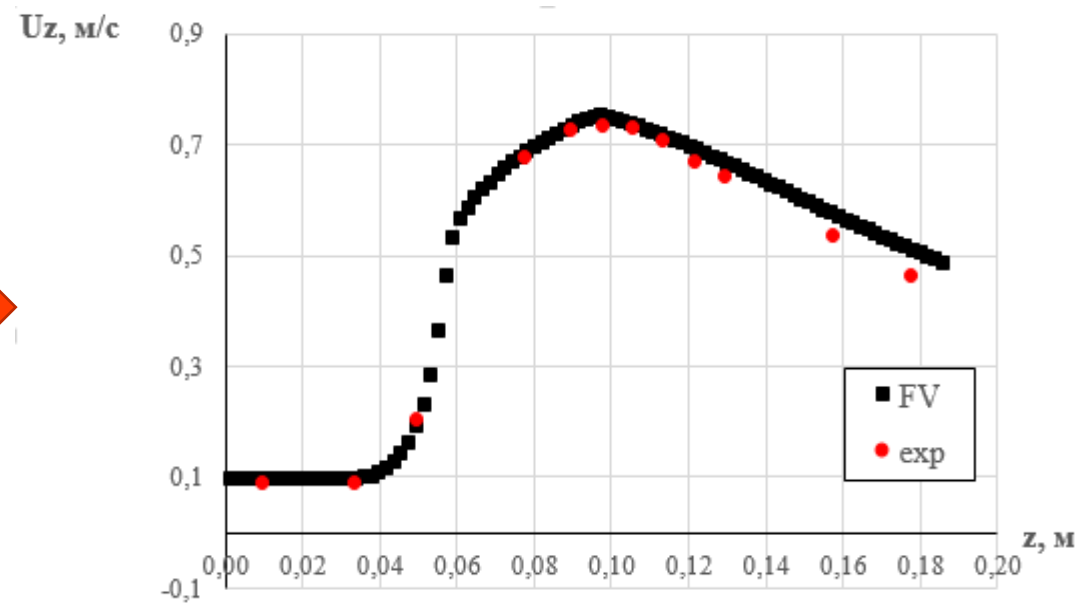
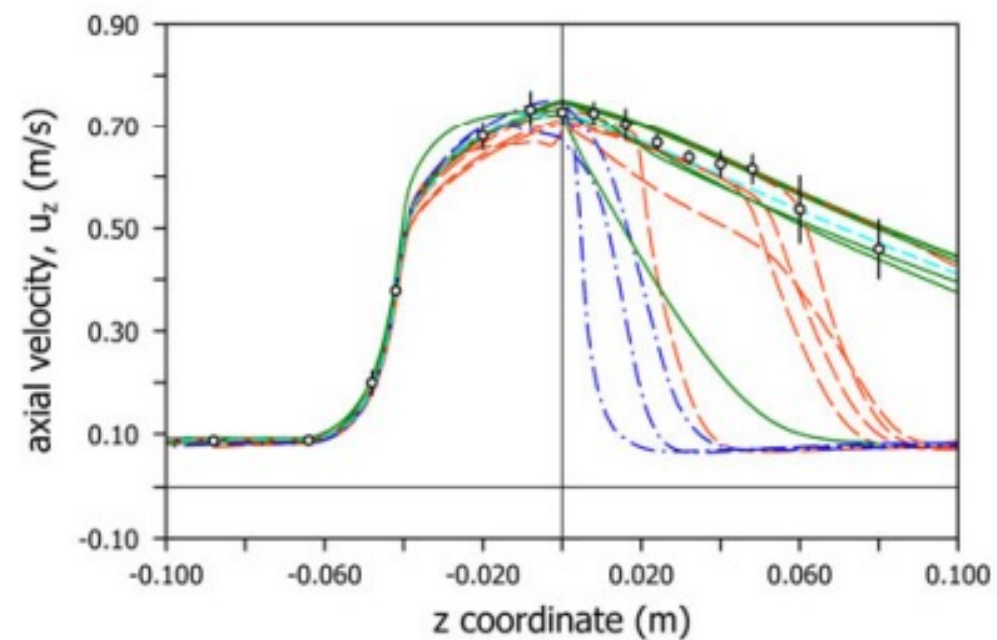
## Стенки:

Условие прилипания

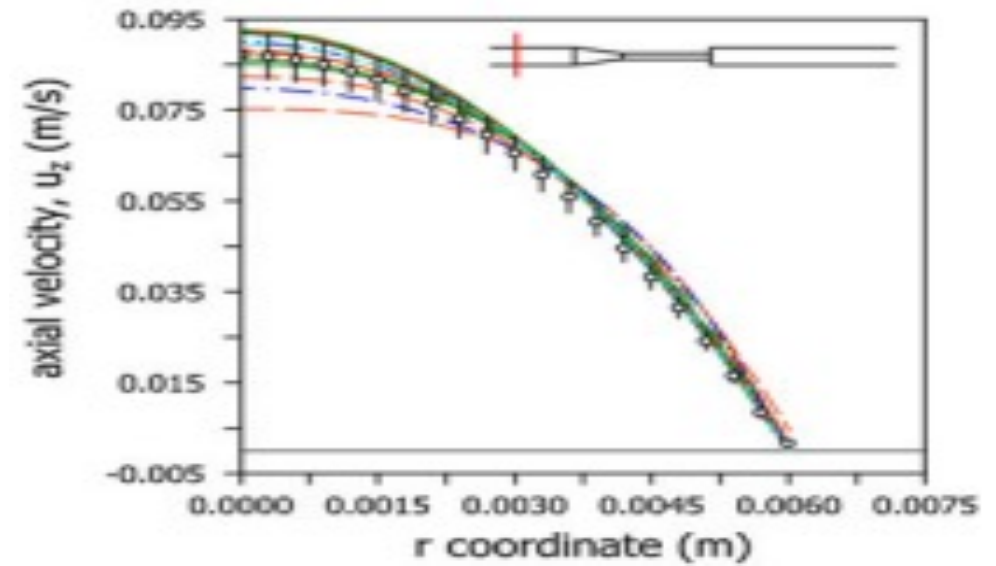
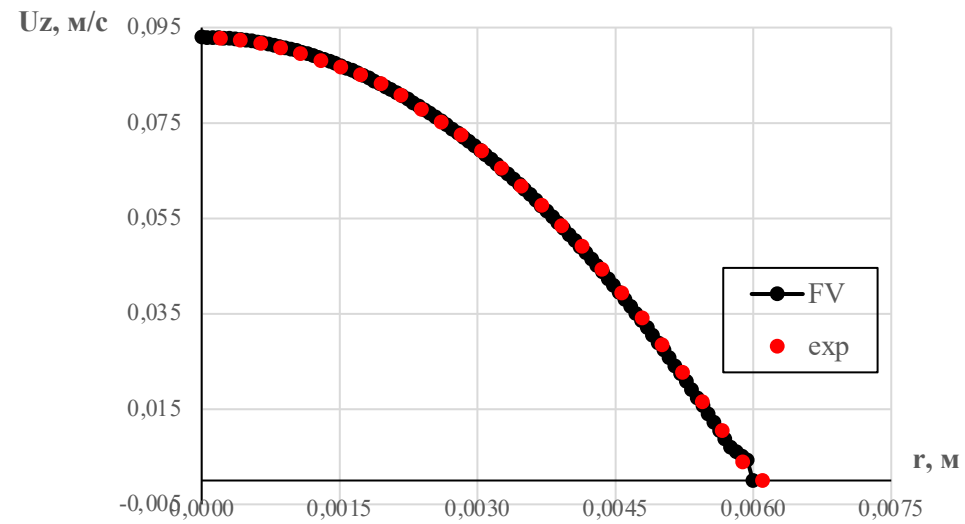
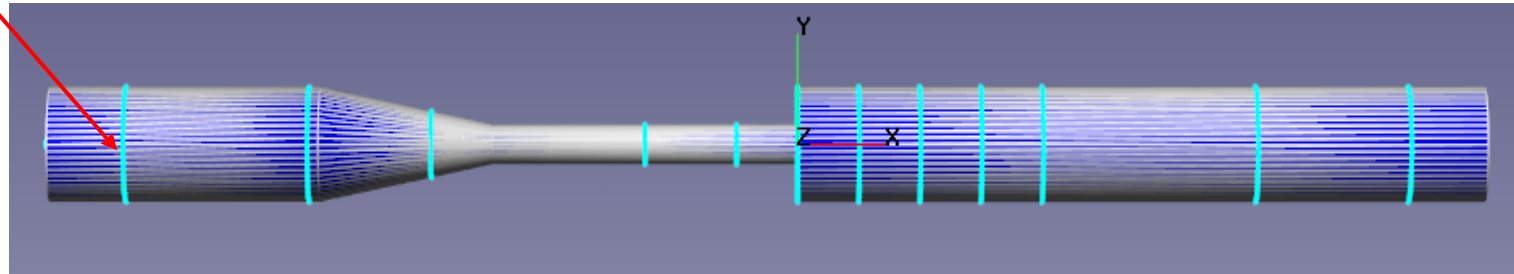


*Re = 500*

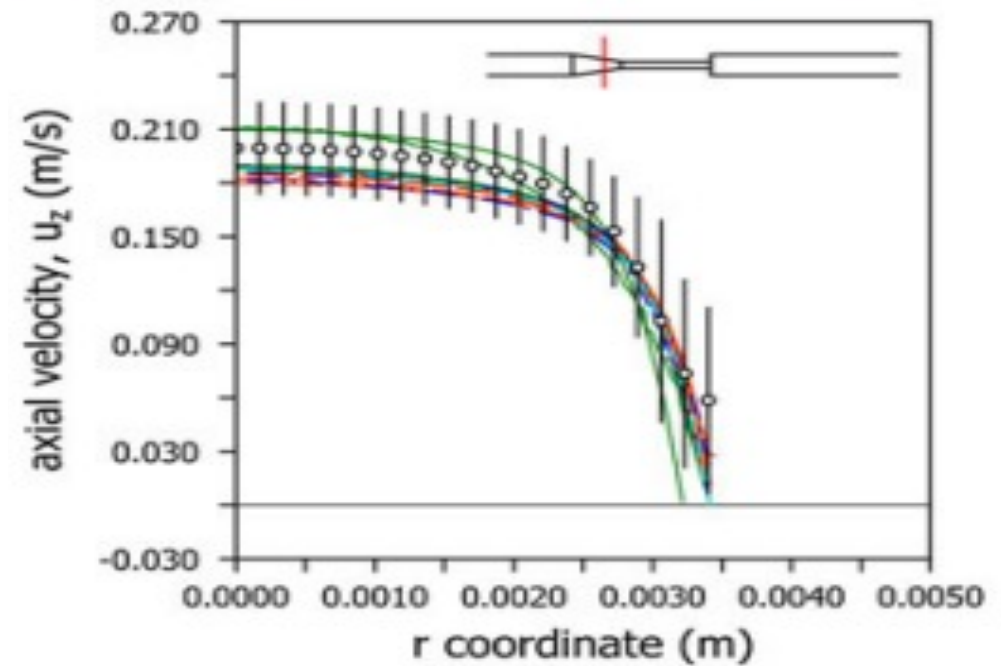
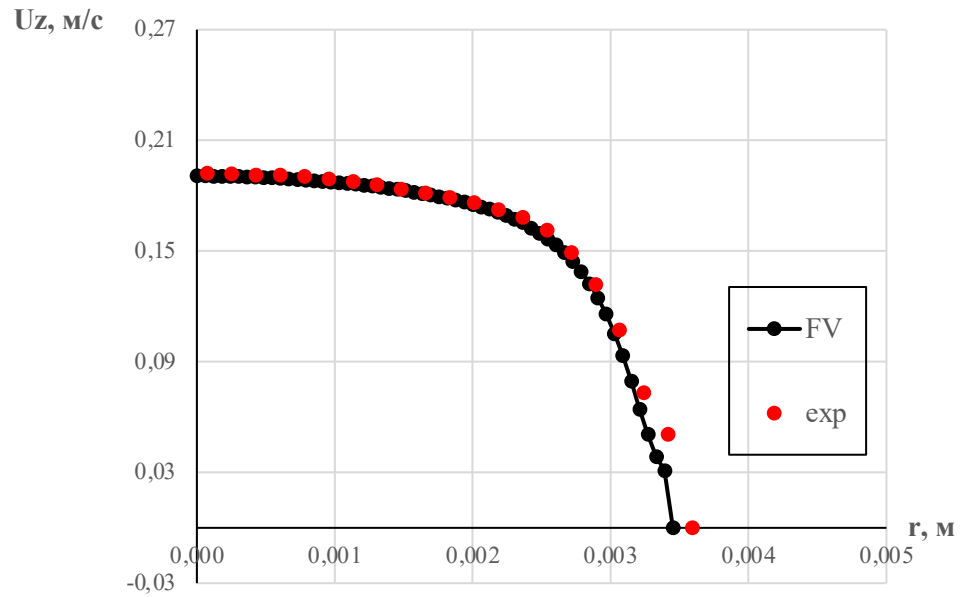
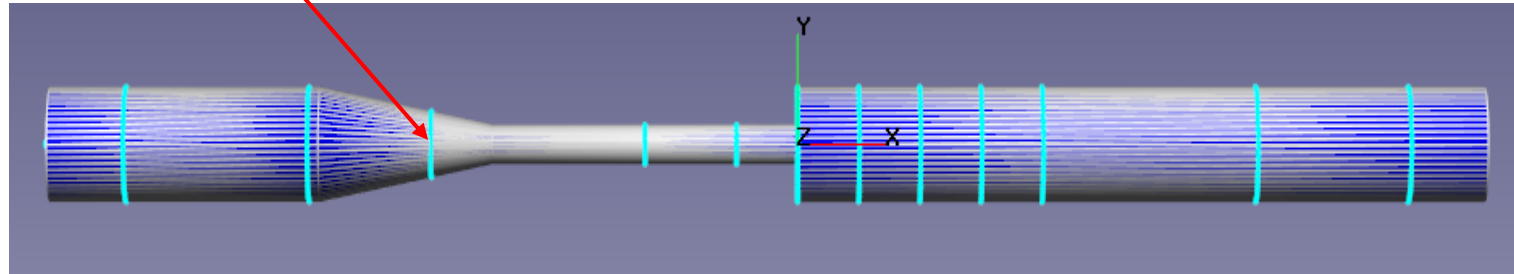




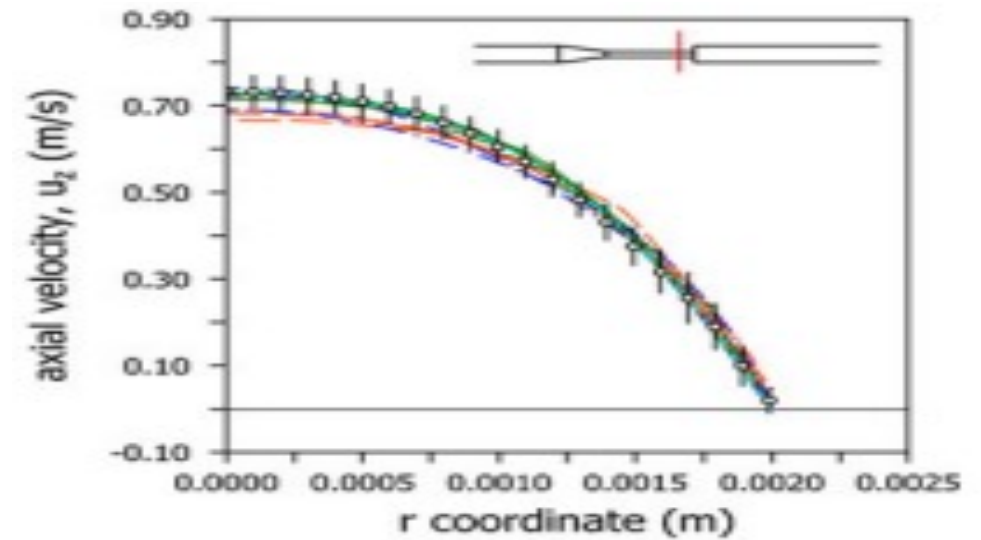
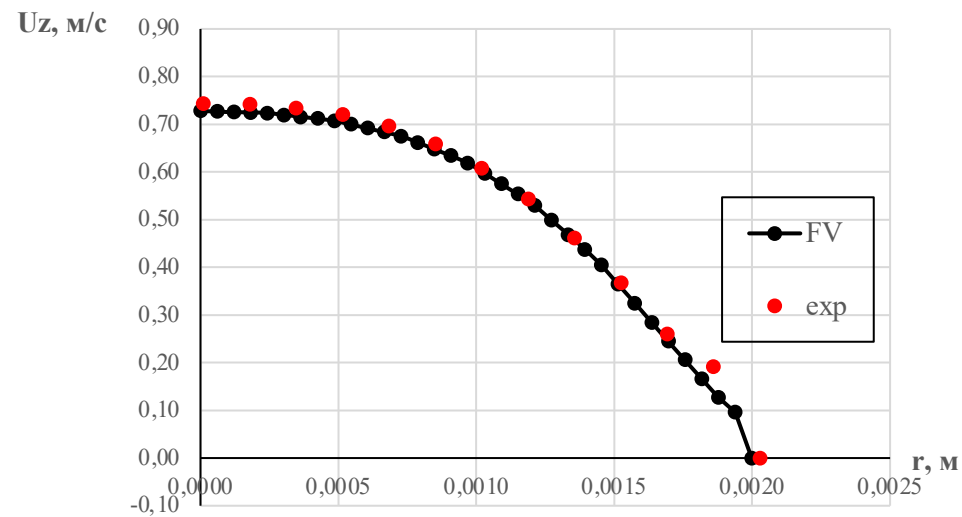
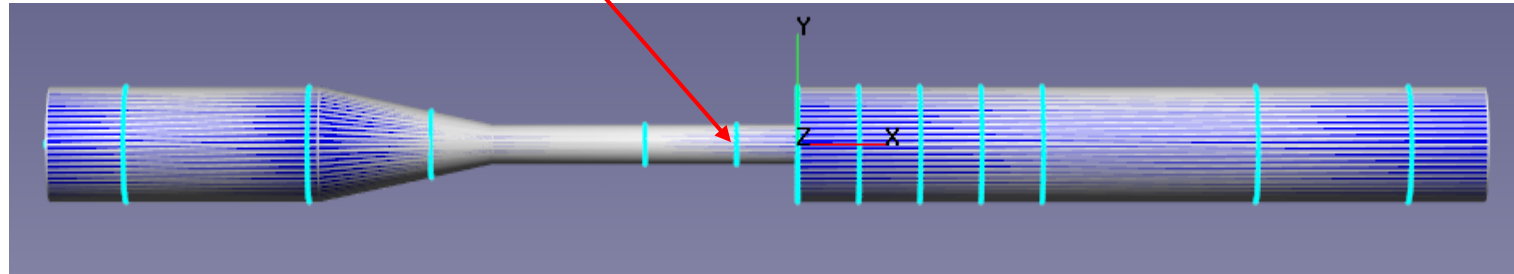
$z = -0,08 \text{ m}$



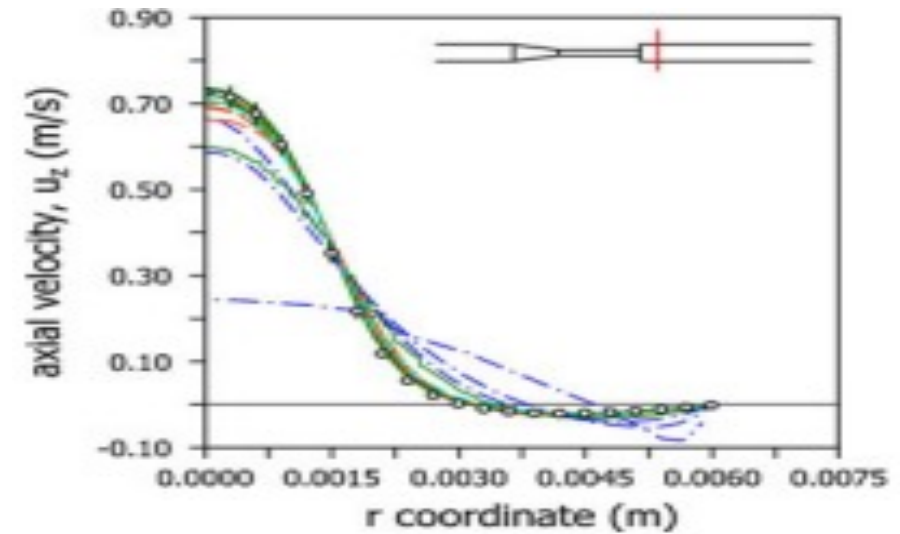
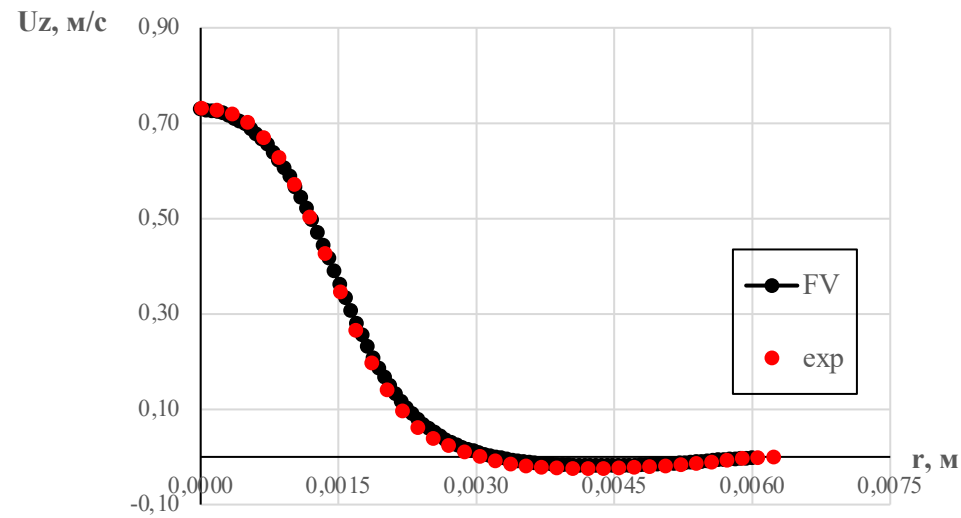
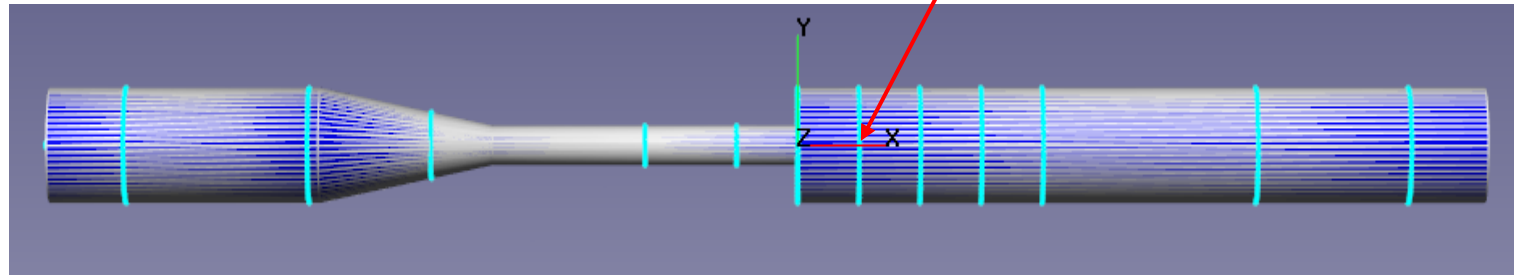
$z = -0,048 \text{ m}$



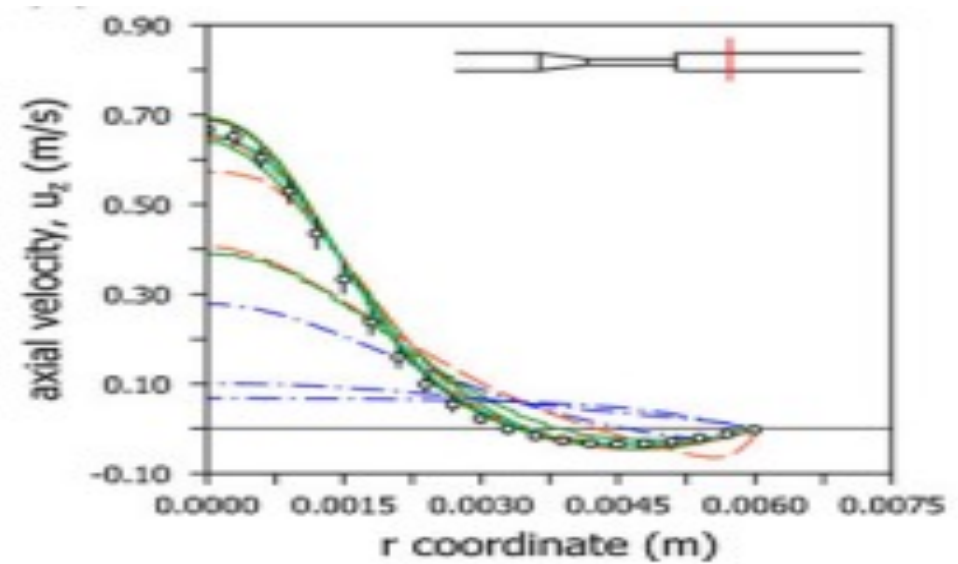
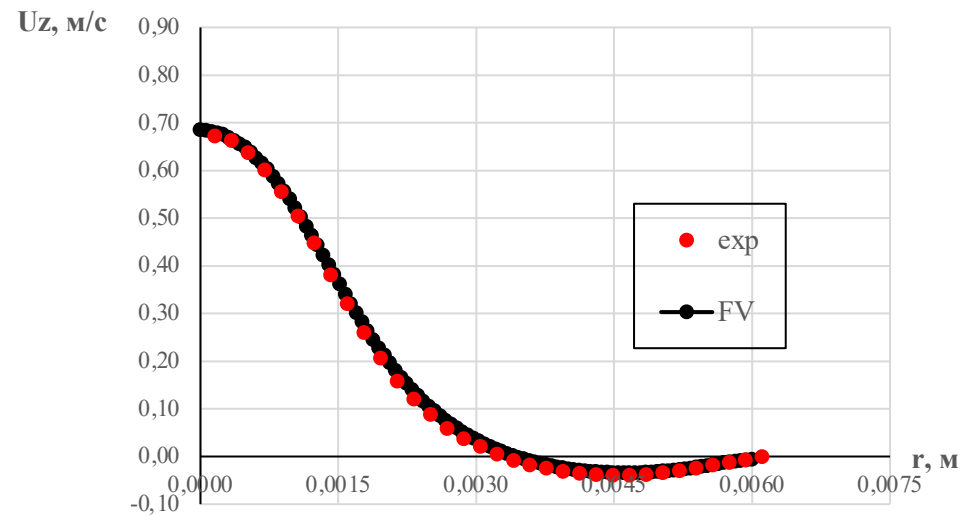
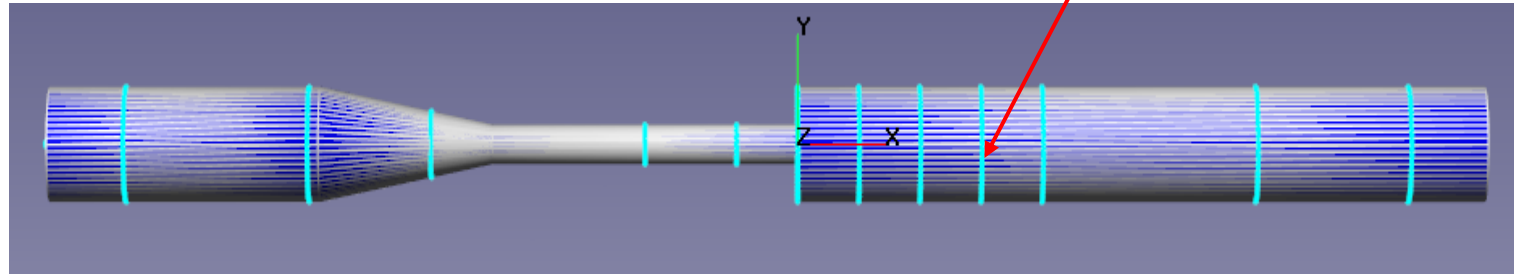
$z = -0,008 \text{ m}$

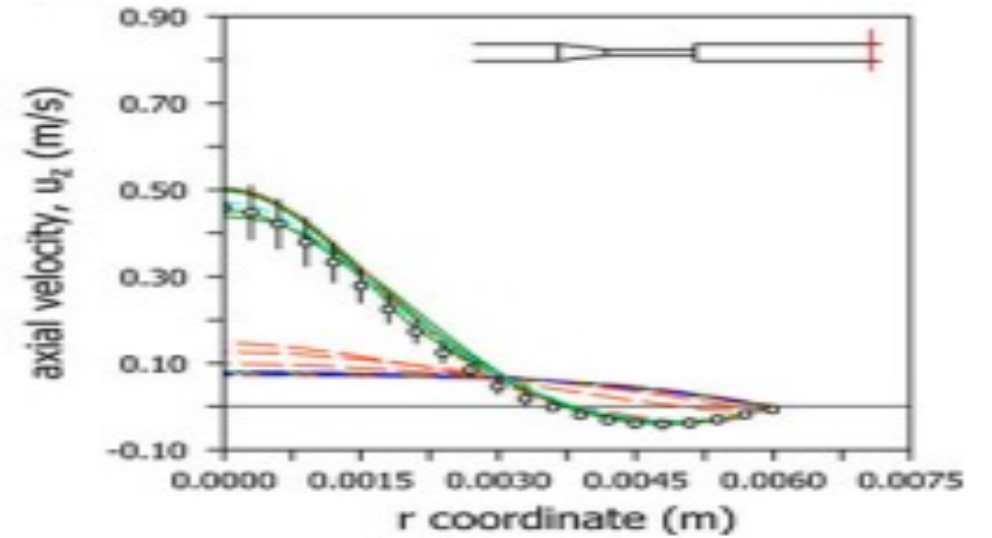
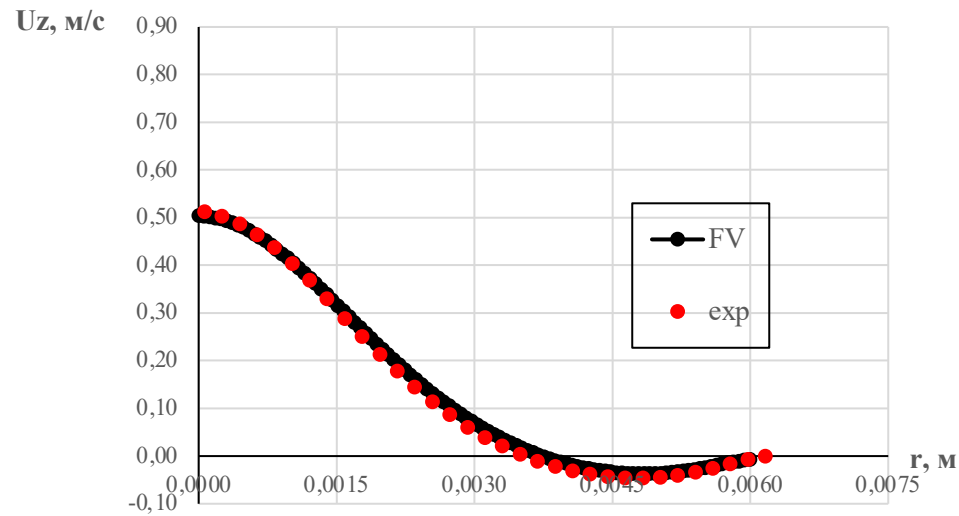
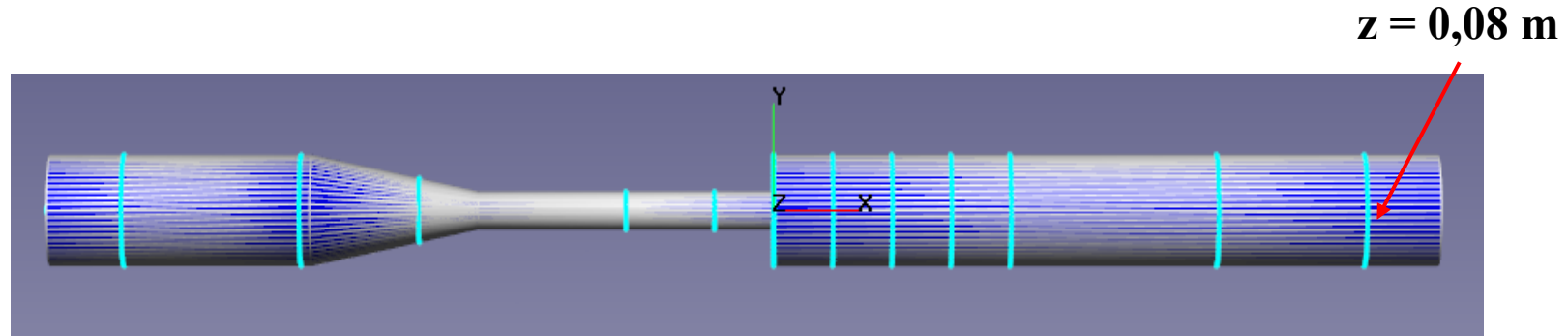


$z = 0,008 \text{ m}$



$z = 0,024 \text{ m}$





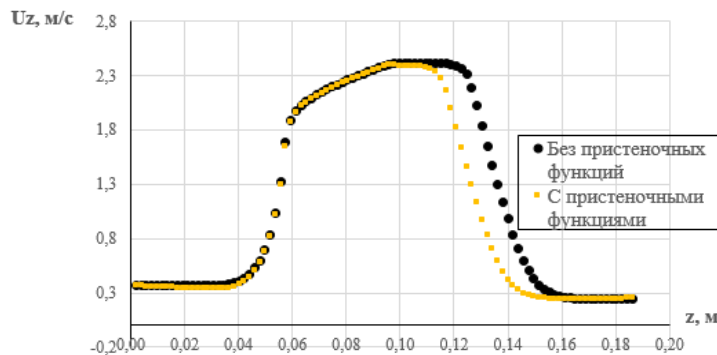
### Заключение

1. Значения скорости в направлении координаты  $z$  и в поперечных сечениях имеют хорошее согласование с результатами эксперимента.

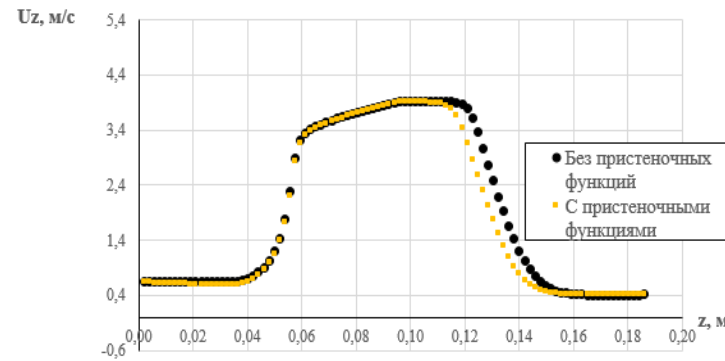


*Re = 2000 u 3500*

При  $Re_t = 2000$  и  $3500$  дополнительно проведены расчеты без пристеночных функций. Для этих расчетов сетка была построена так, чтобы безразмерный параметр  $Y^+$  — первый пристеночный шаг по нормали к стенке в координатах закона стенки  $\frac{Y \cdot V^*}{\nu}$ , где  $V^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  — динамическая скорость, имел значение меньше 1.

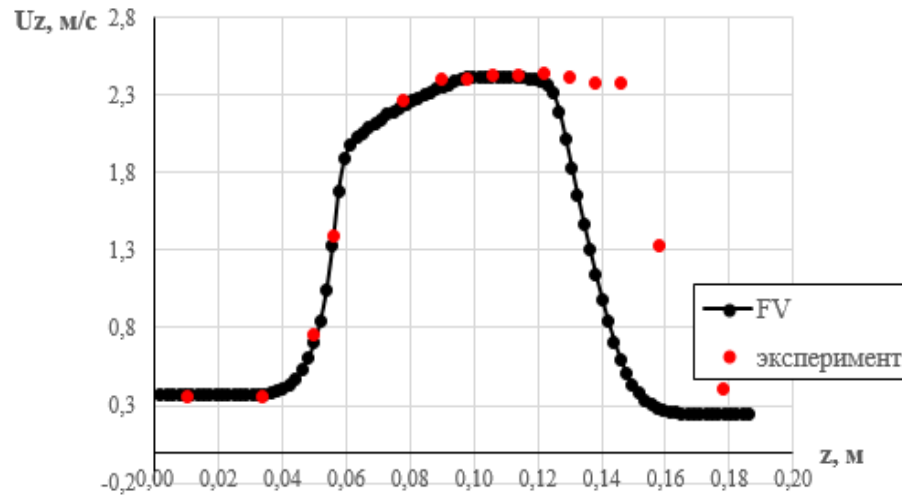


а)  $Re_t = 2000$

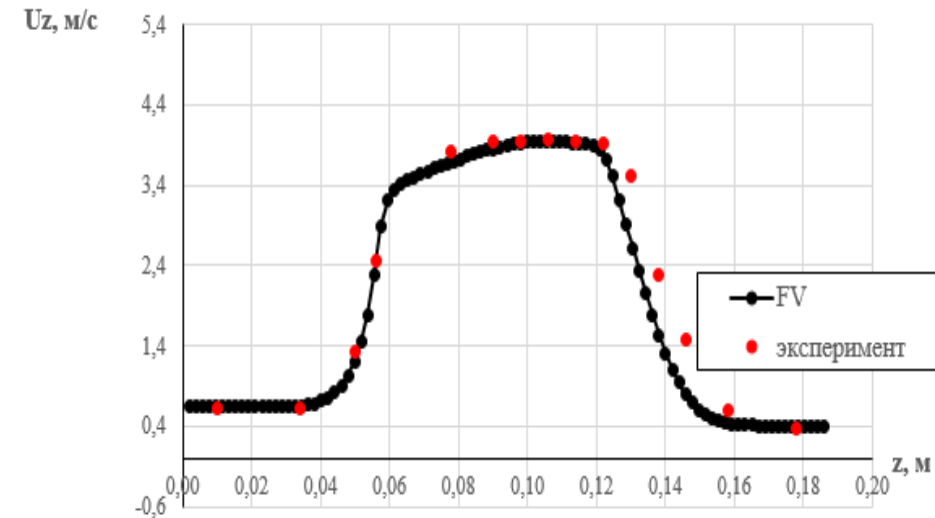


б)  $Re_t = 3500$

Для расчета при  $Re_t = 2000$  и  $3500$  были выбраны сетки, соответствующие  $Y^+ < 1$  (пристеночные функции не использовались).

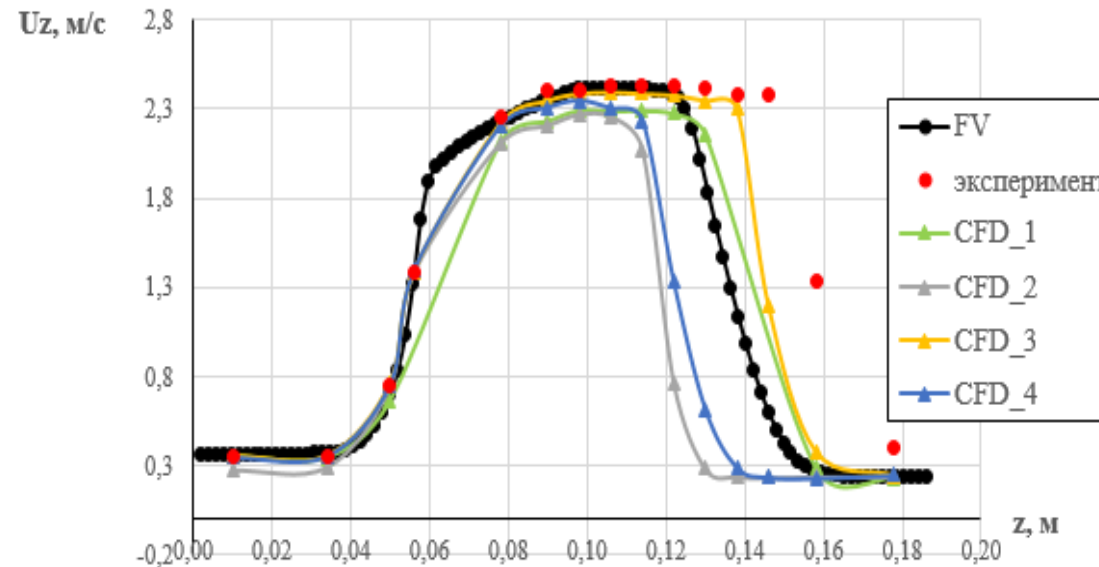


а)  $Re_t = 2000$

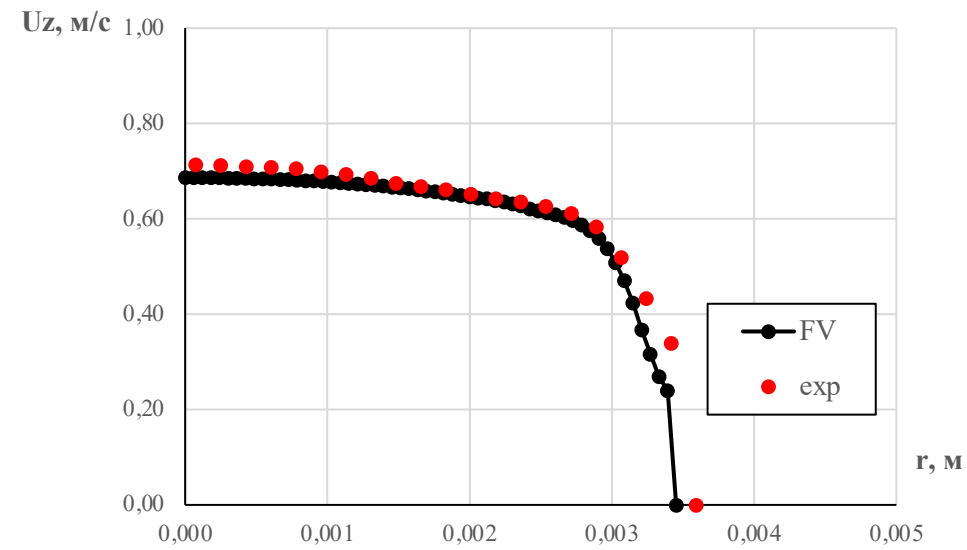
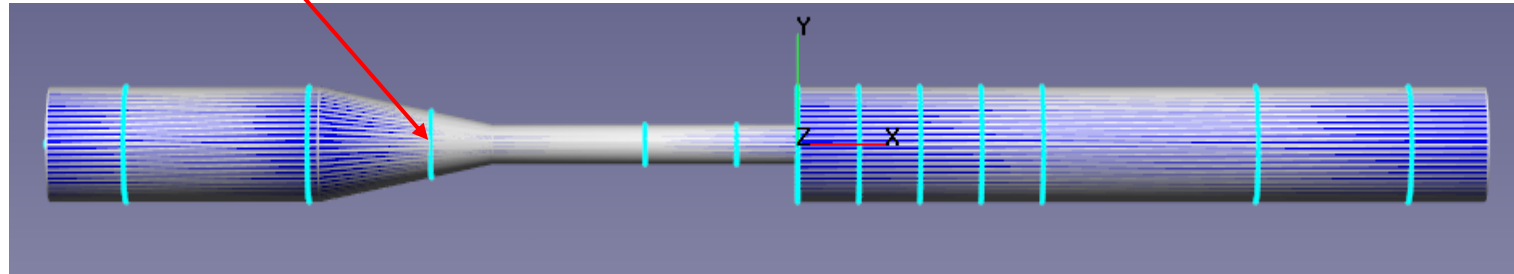


б)  $Re_t = 3500$

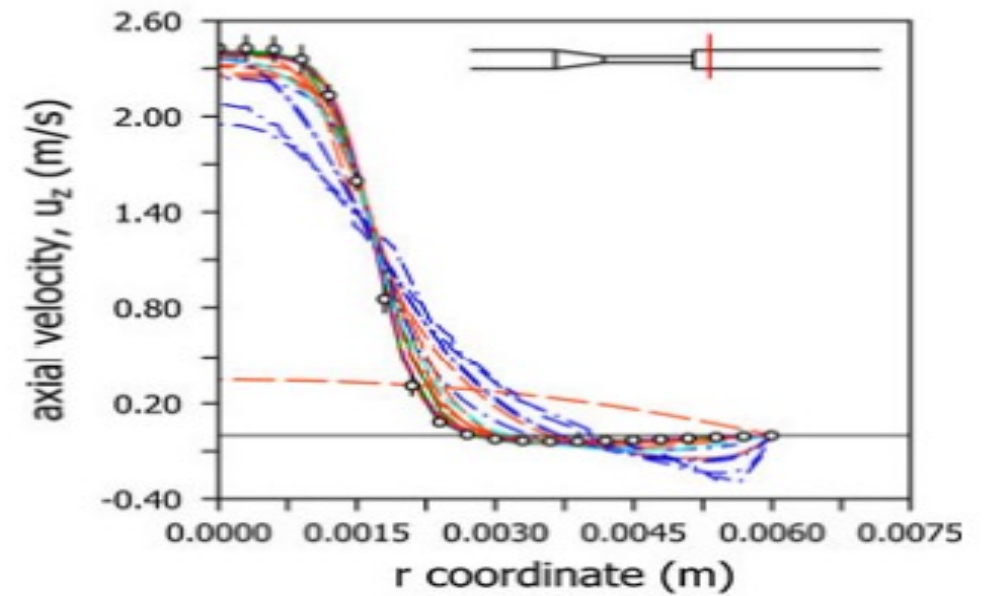
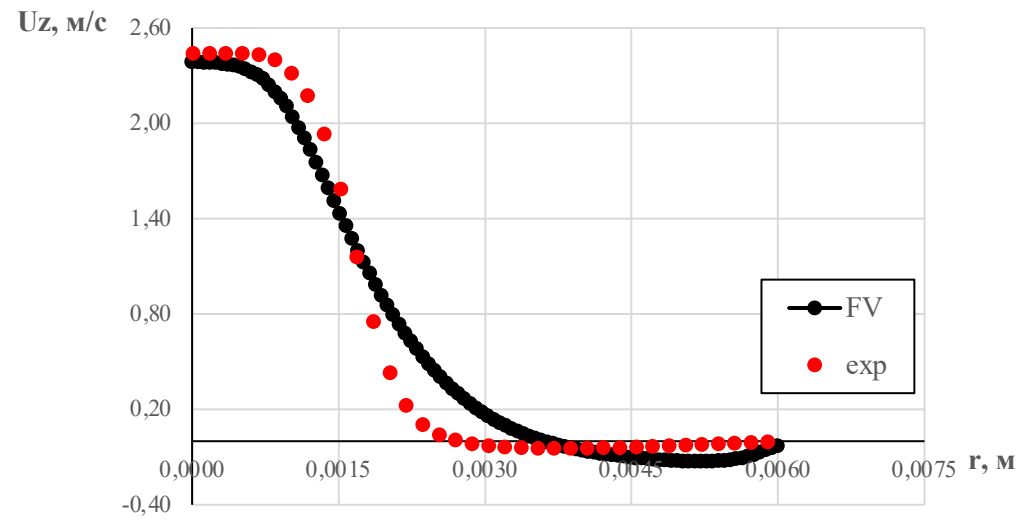
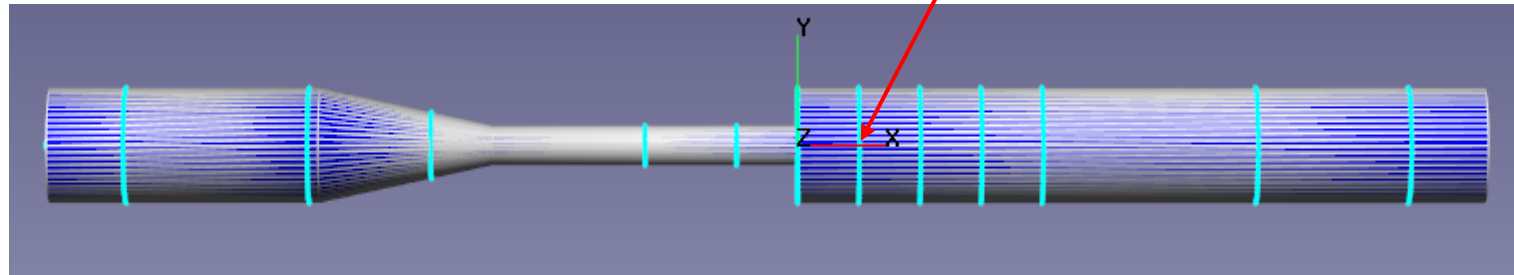
При  $Re_t = 2000$  расхождения с экспериментальными данными не больше полученных в других пакетах. Результаты численного моделирования, полученные в других программных комплексах, обозначены как CFD\_1 - CFD\_4.



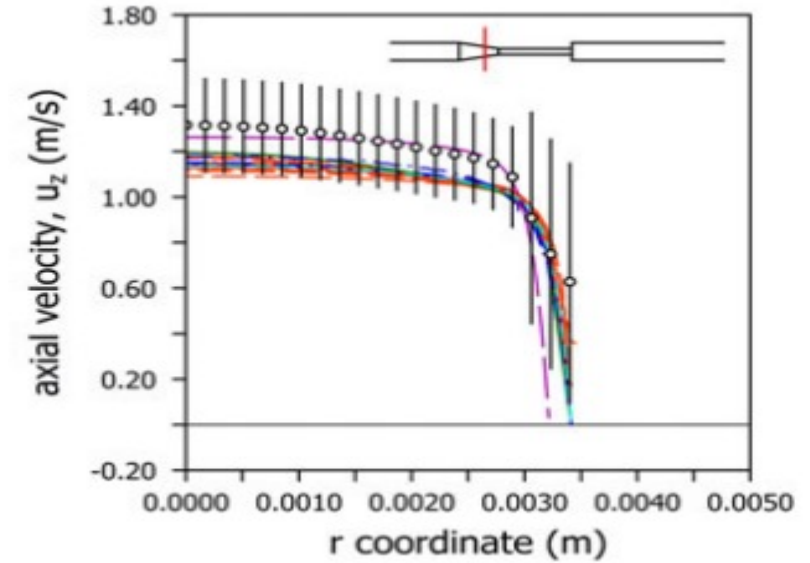
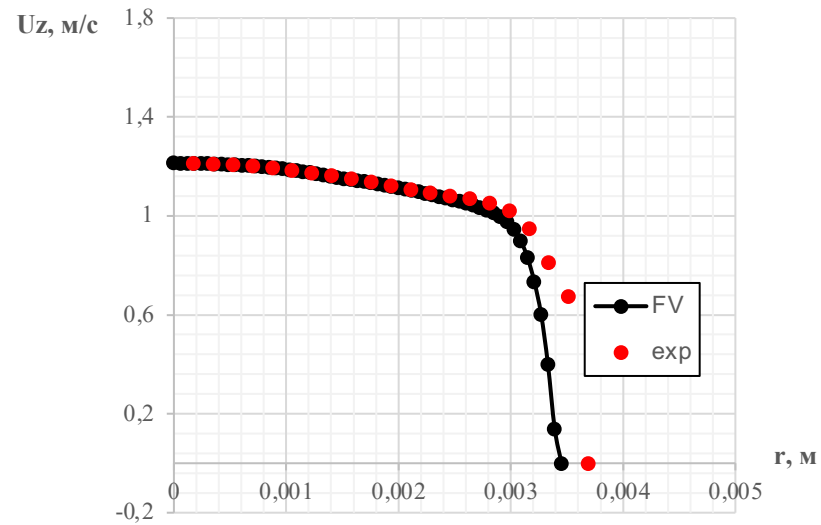
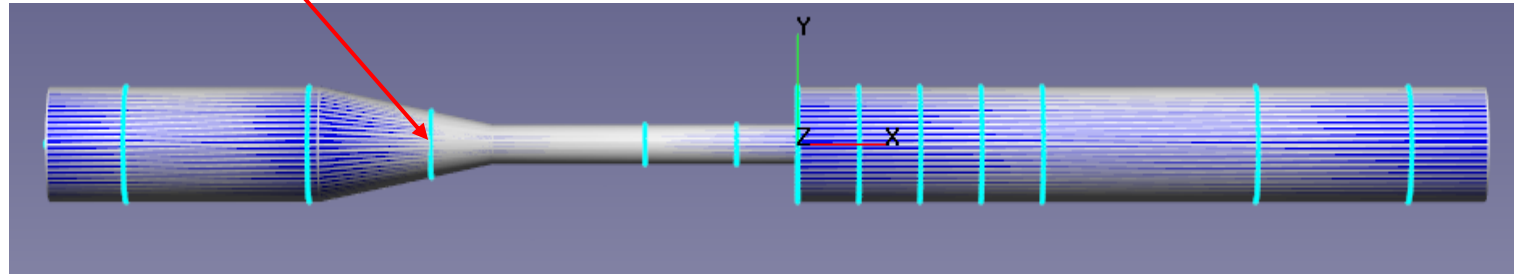
$z = -0,048 \text{ m}$



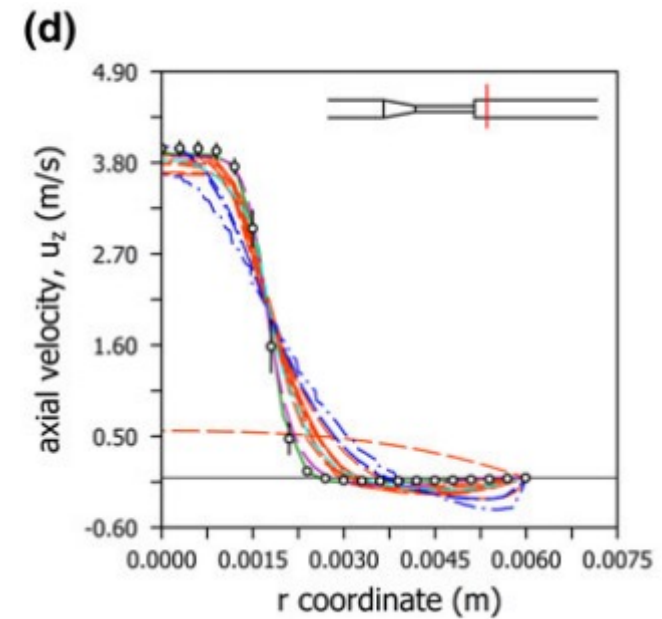
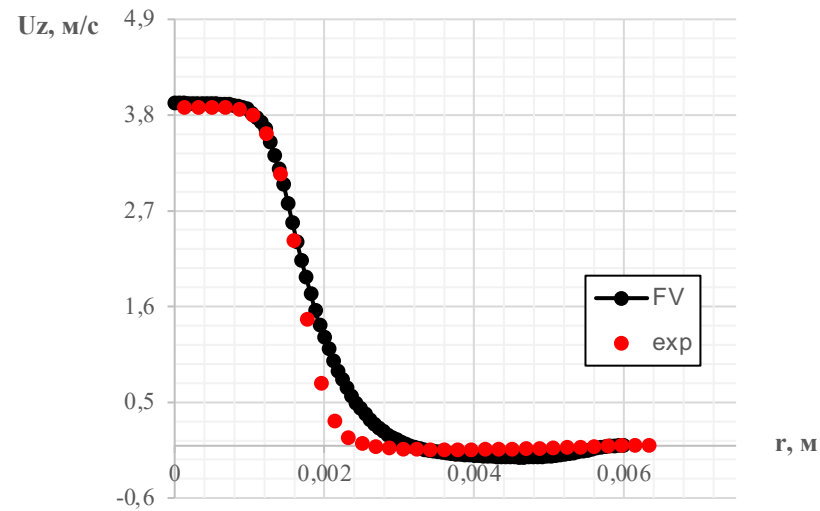
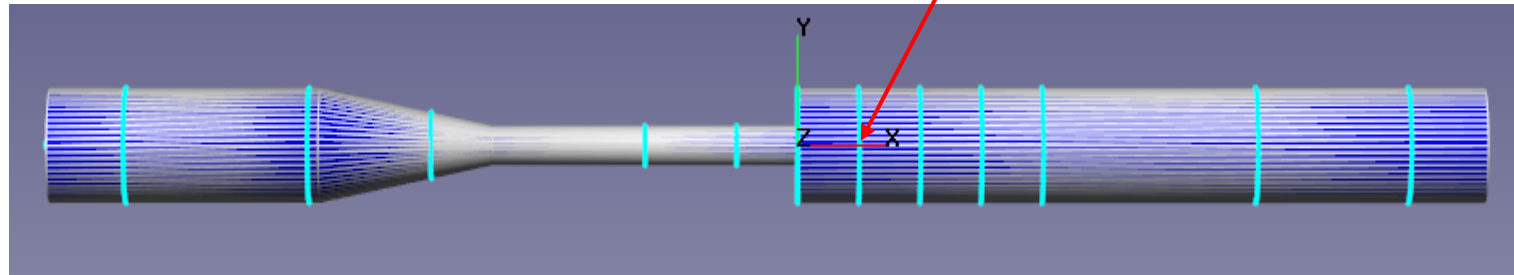
$z = 0,008 \text{ m}$



$z = -0,048 \text{ m}$



$z = 0,008 \text{ m}$

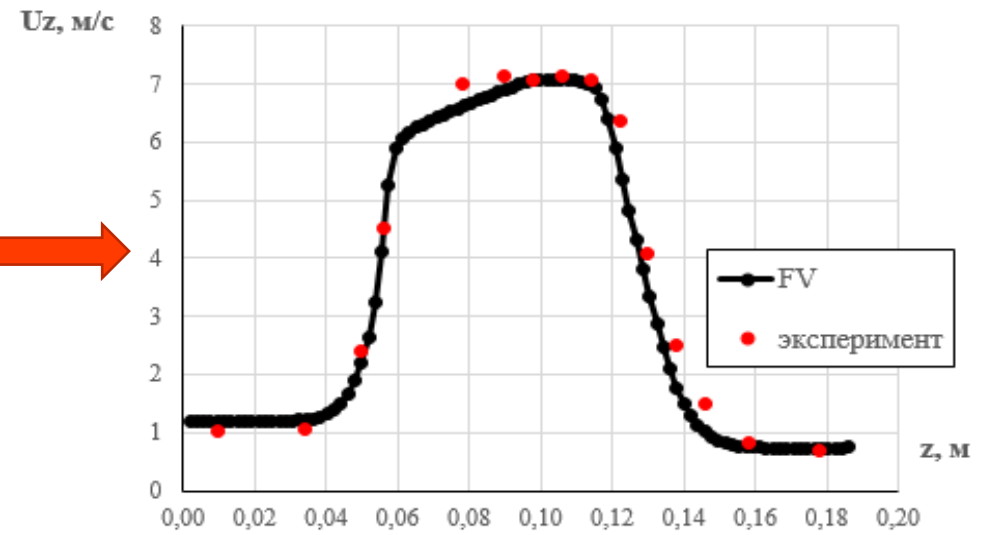
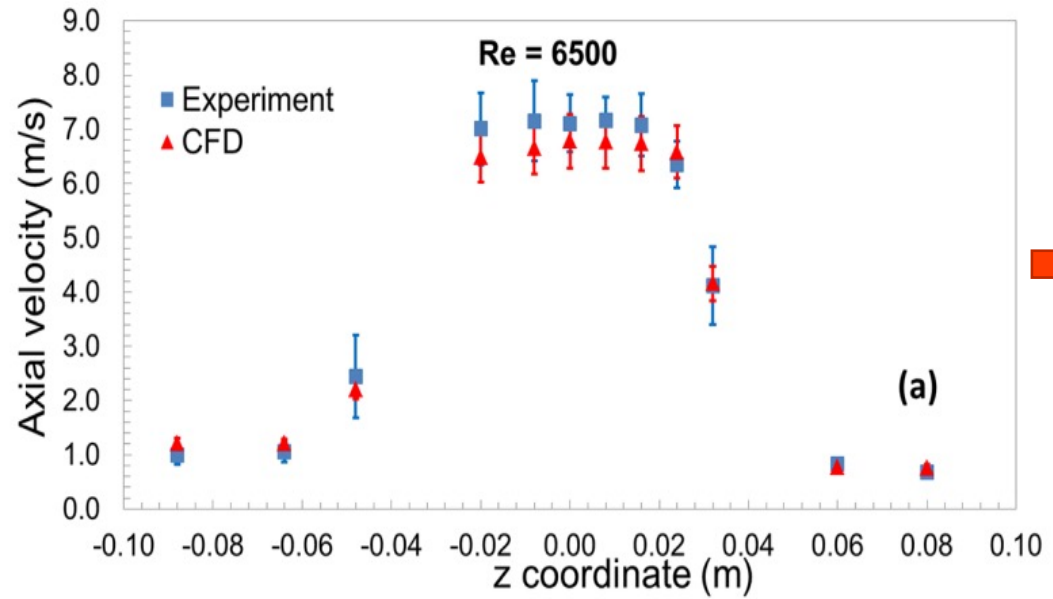




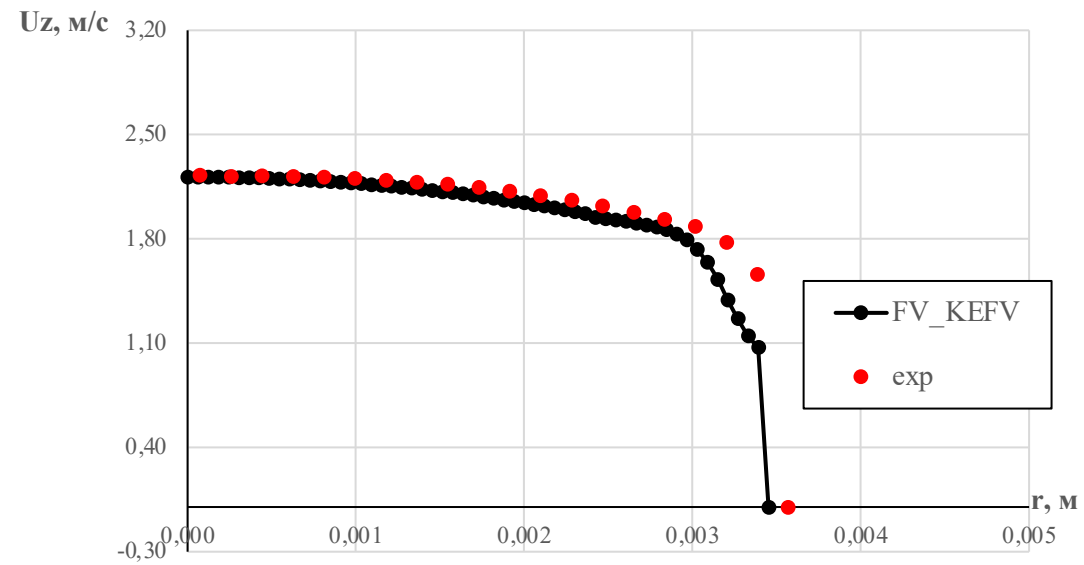
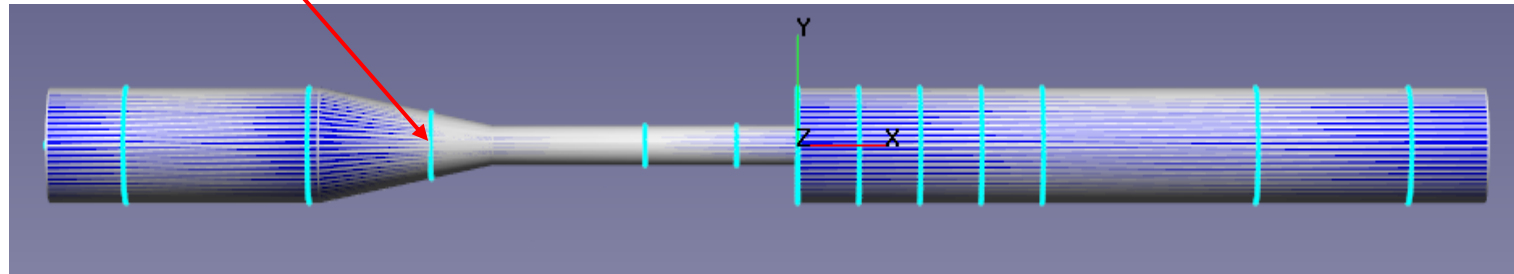
### Заключение

1. При  $Re = 2000$  значения скорости в направлении координаты  $z$  и в поперечных сечениях имеют значительные отличия от экспериментальных данных после резкого расширения сопла, однако соответствуют аналогичным расчетам в других программных комплексах.
2. При  $Re = 3500$  значения скорости в направлении координаты  $z$  и в поперечных сечениях, полученные без использования пристеночных функций, имеют хорошее согласование с экспериментальными данными.

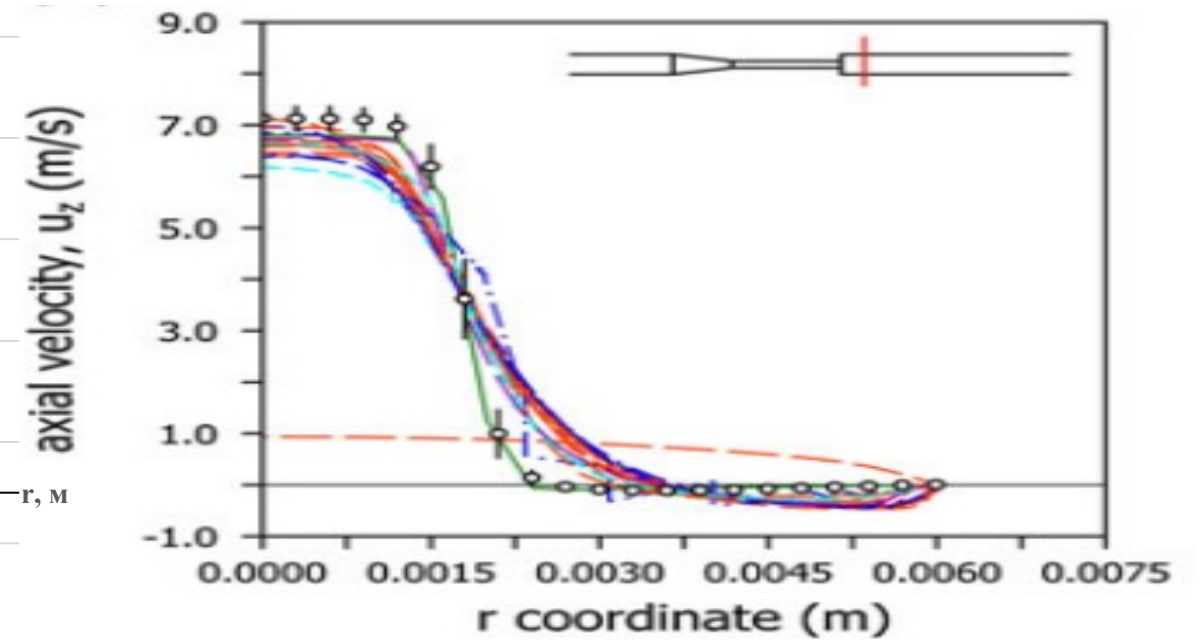
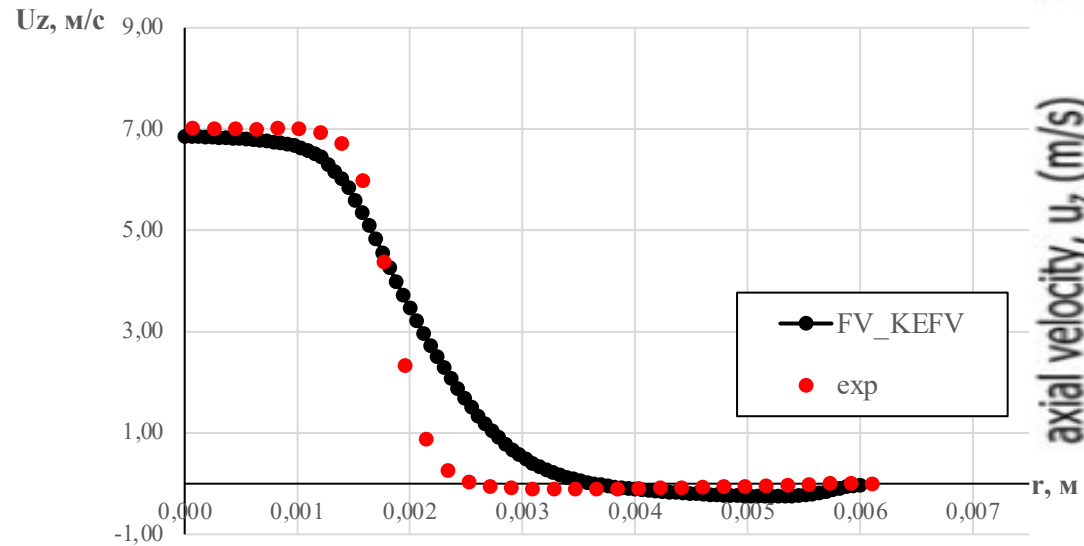
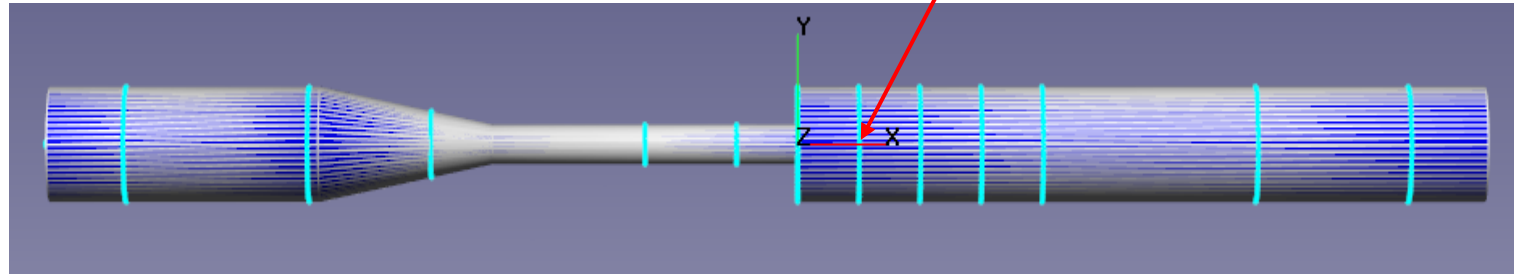
*Re = 6500*



$z = -0,048 \text{ m}$



$z = 0,008 \text{ m}$

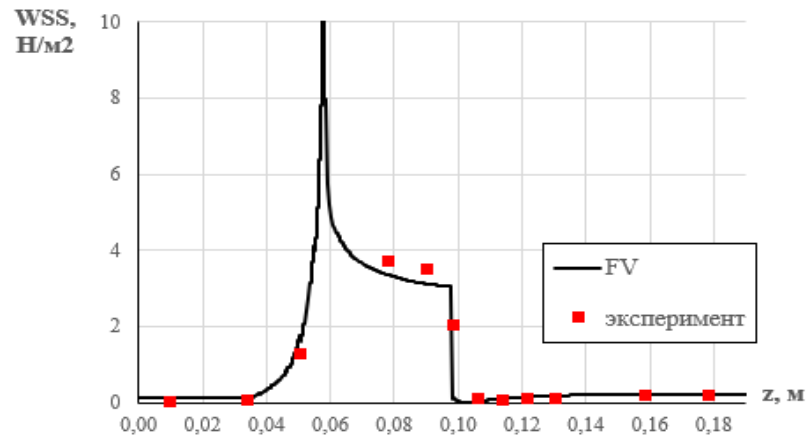


### Заключение

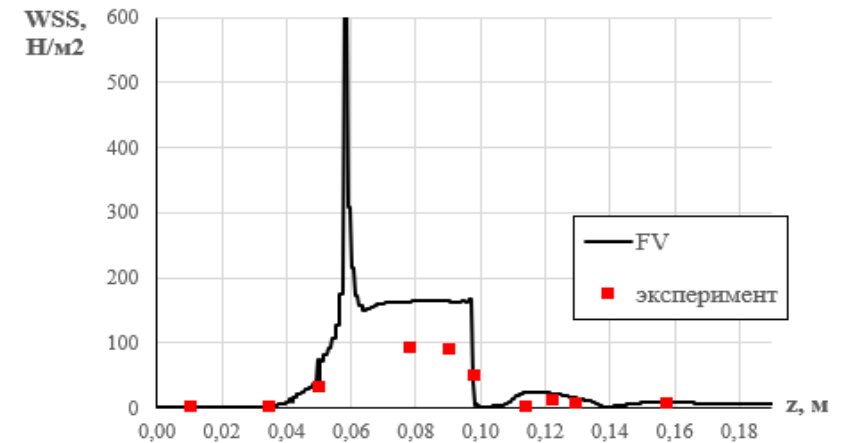
1. Наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными.

*Сдвиговые напряжения на стенке (WSS) при  $Re = 500$  и  $Re = 6500$*

Распределение сдвиговых напряжений на стенке (Wall shear stress - WSS) сопла сравнивалось с данными эксперимента FDA.



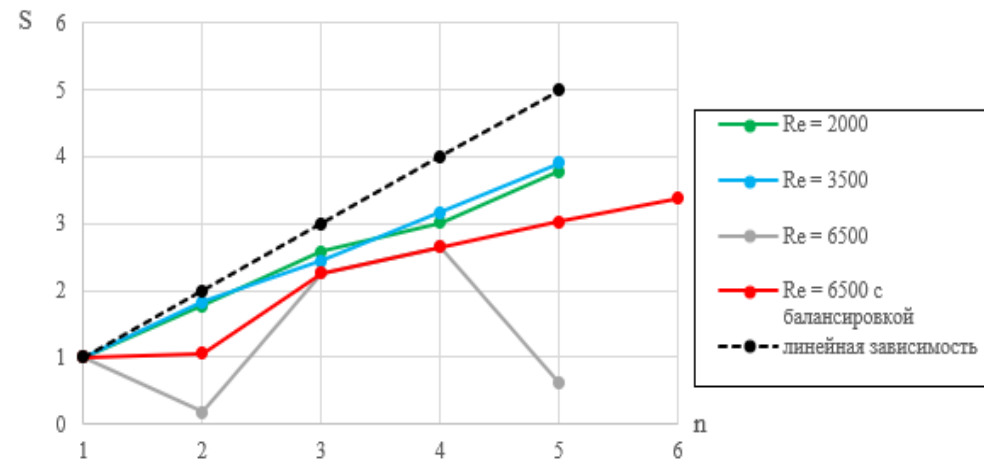
а)  $Re_t = 500$



б)  $Re_t = 6500$



В качестве оценки эффективности распараллеливания расчетов использовалось отношение  $S$  (относительное ускорение) физического времени счета одного шага, измеряемого в секундах, полученного при расчете на 1 узле к времени счета одного шага, полученного при расчете на нескольких узлах  $n$ .



Полученные значения осевой скорости в зависимости от координаты  $z$  при ламинарном, переходном и турбулентном режимах имеют хорошее согласование с экспериментальными данными.

Хорошее совпадение тестовых результатов расчетов с гемодинамическими экспериментами в искусственной системе открывает возможность решать более сложные задачи гемодинамики.

Существенному увеличению производительности вычислений в случаях, когда особенности постановки расчетной задачи приводят к дисбалансу загрузки процессоров, способствует специальная технология FlowVision «Динамическая балансировка».

Спасибо за внимание!