



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



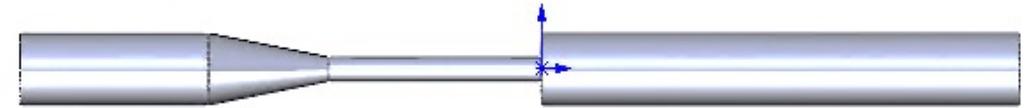
Программный комплекс вычислительной аэро- и гидродинамики FlowVision предназначен для проведения математического моделирования различных физических процессов.

- 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

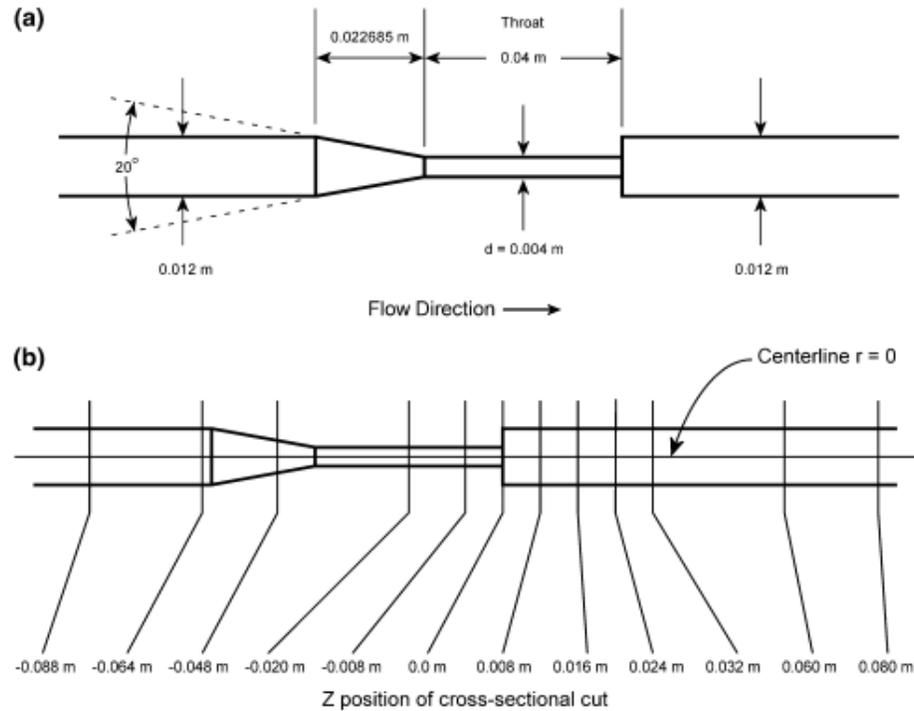
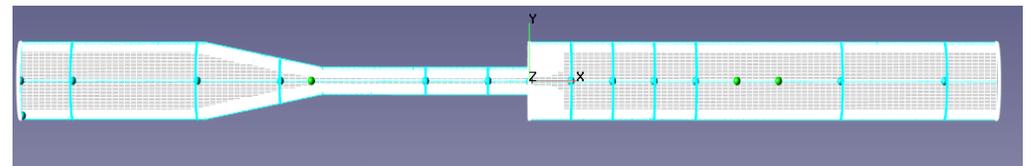
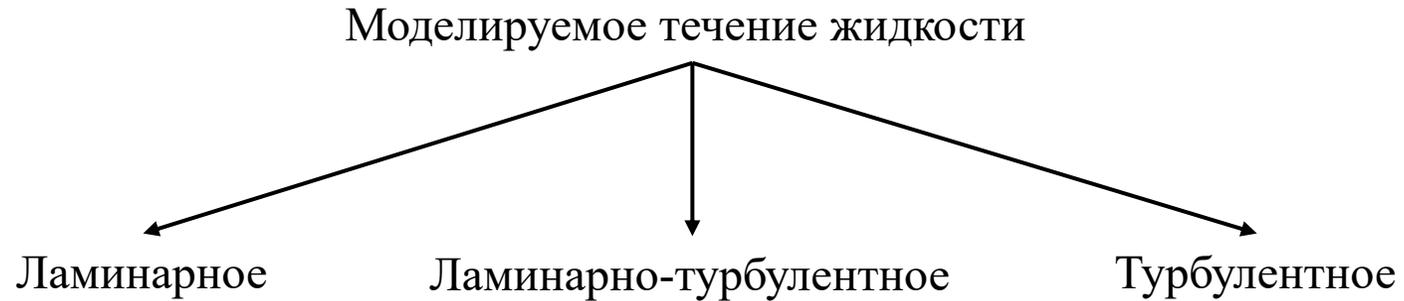
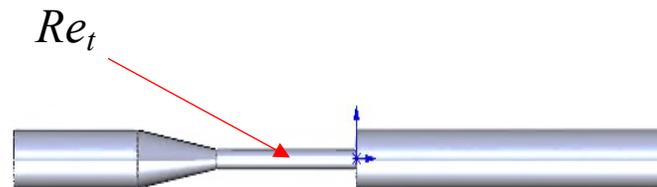


FIGURE 1. Nozzle specifications: (a) dimensions of nozzle (inlet and outlet lengths unspecified); (b) cross-sectional cuts defined for data submission for the sudden expansion.



$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	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

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

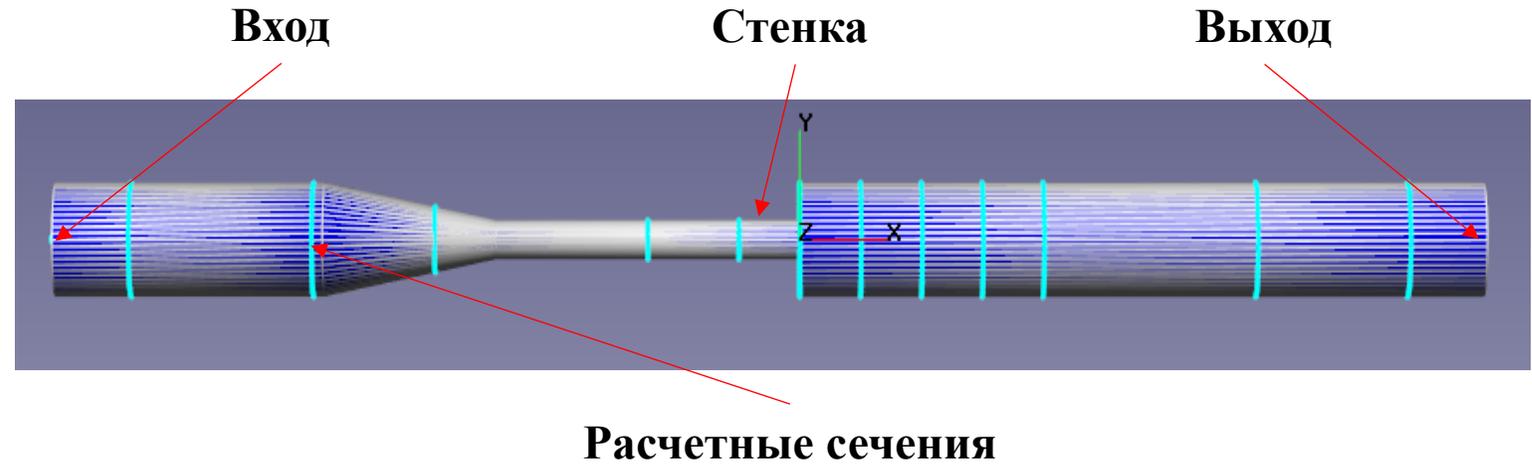
$$\bar{U}_z = Q_{inlet}/A_{inlet}, A_{inlet} = \pi r_{inlet}^2$$

Выход:

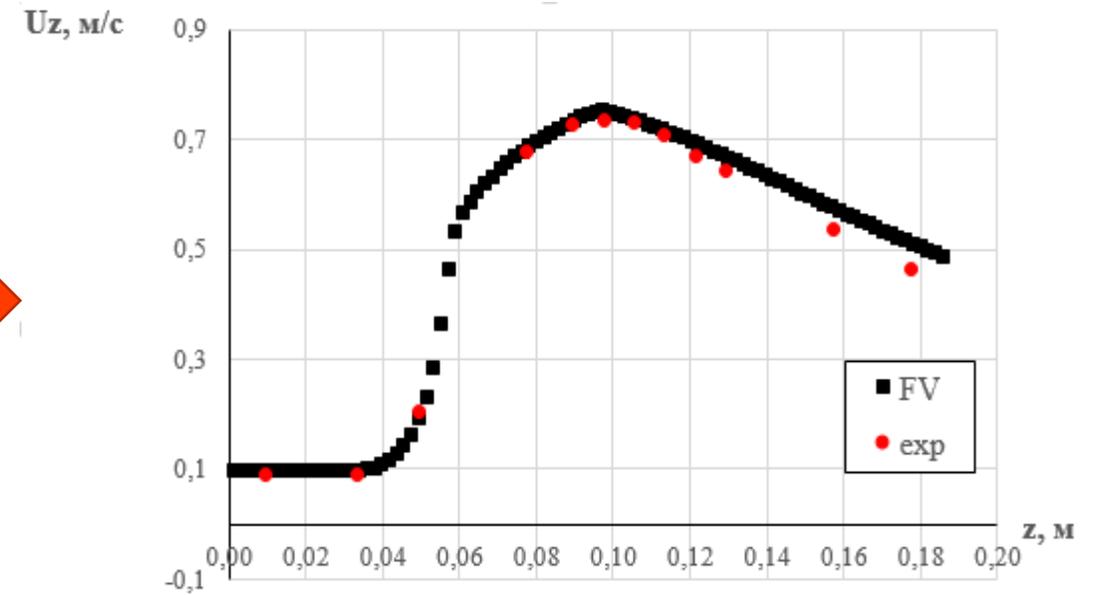
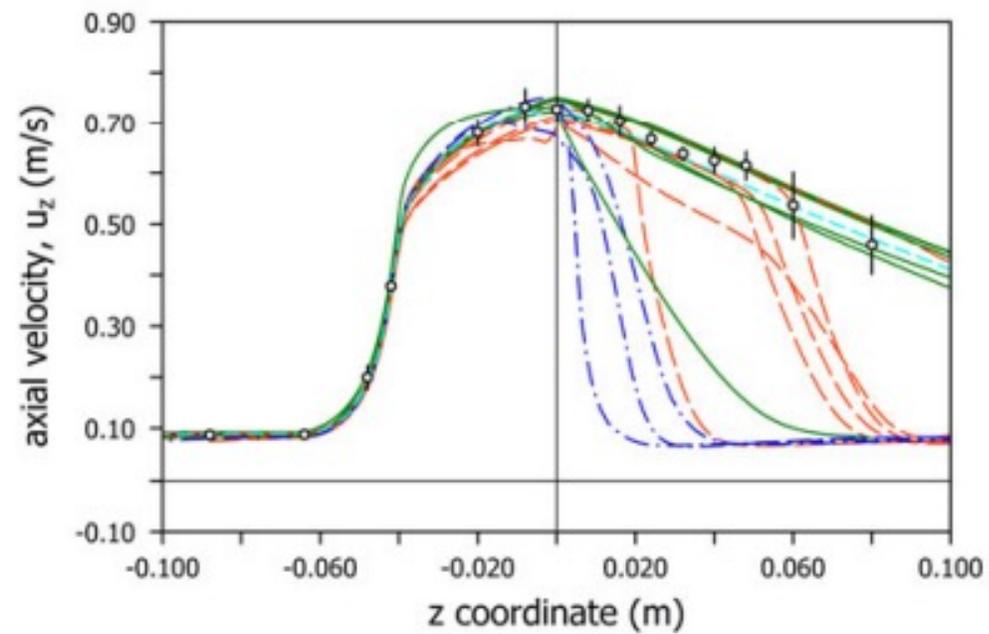
Нулевое давление

Стенки:

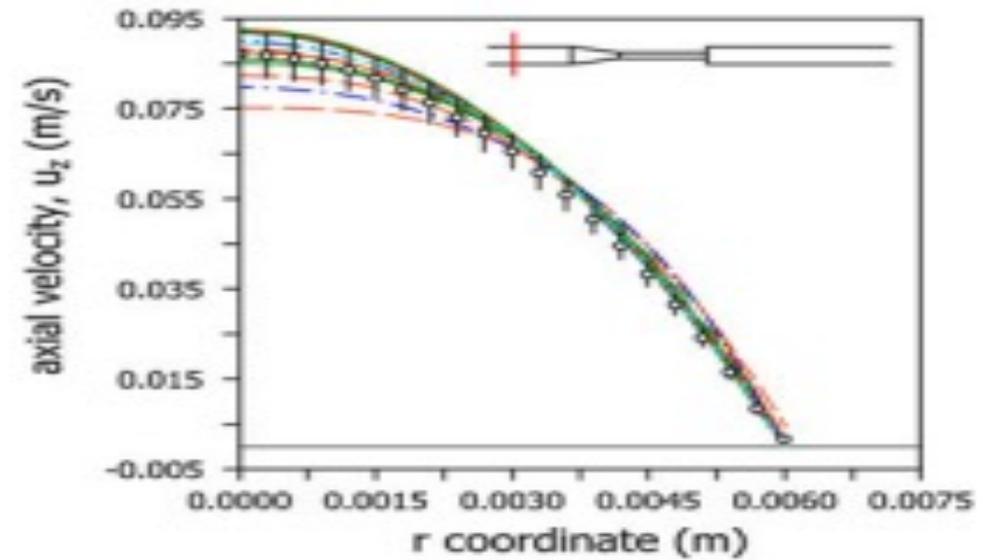
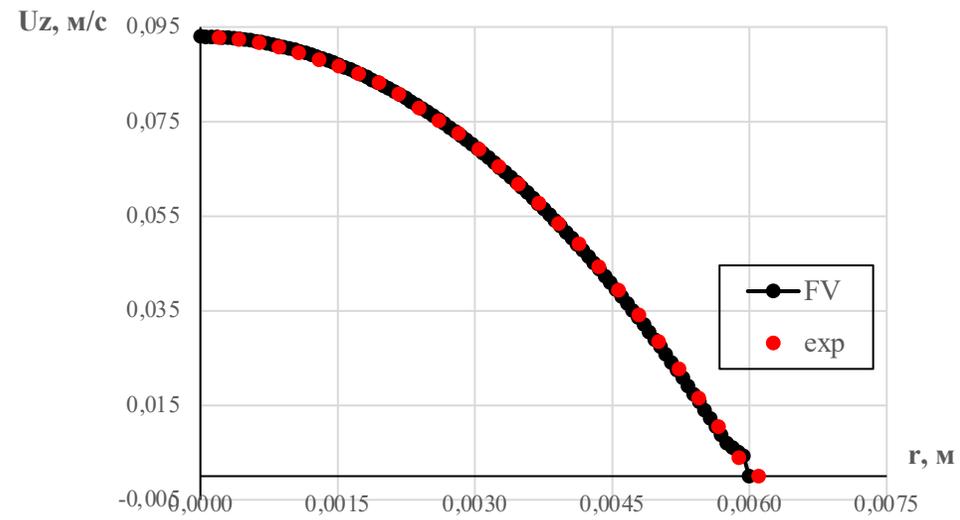
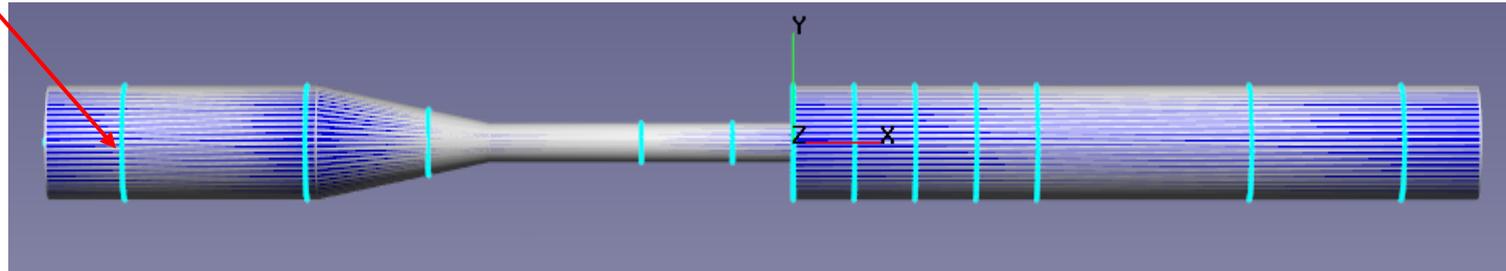
Условие прилипания



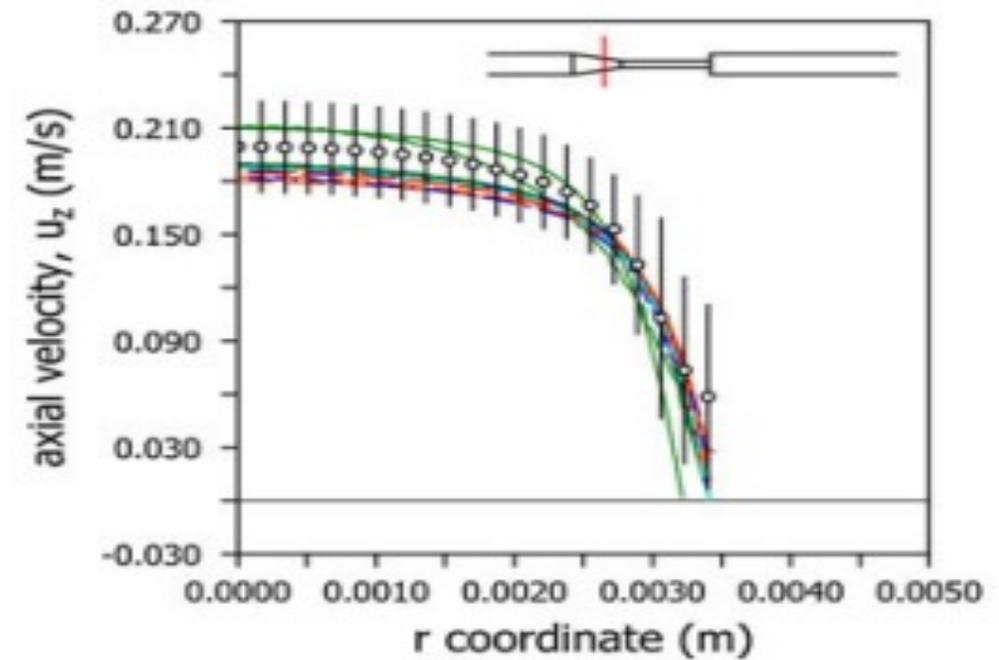
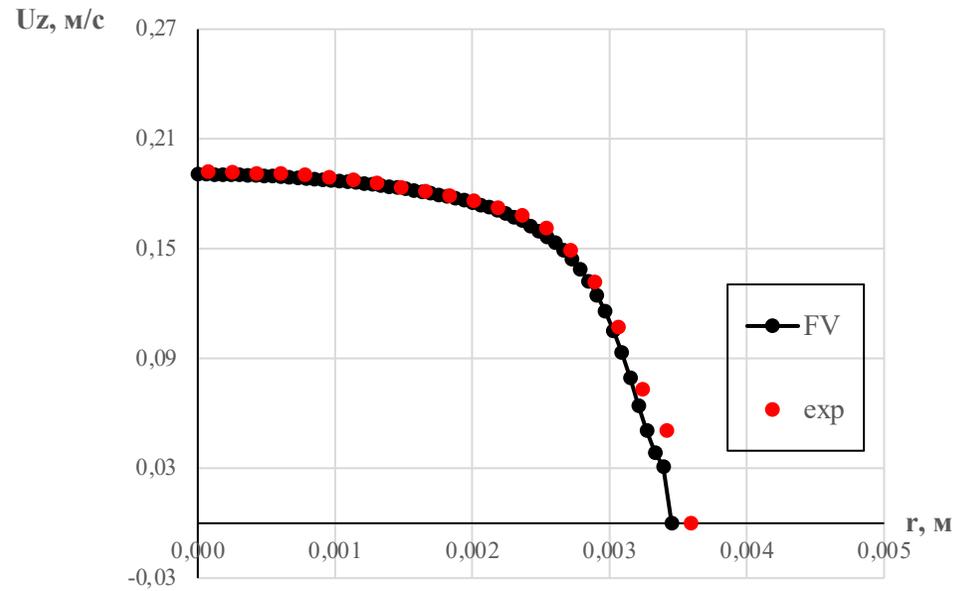
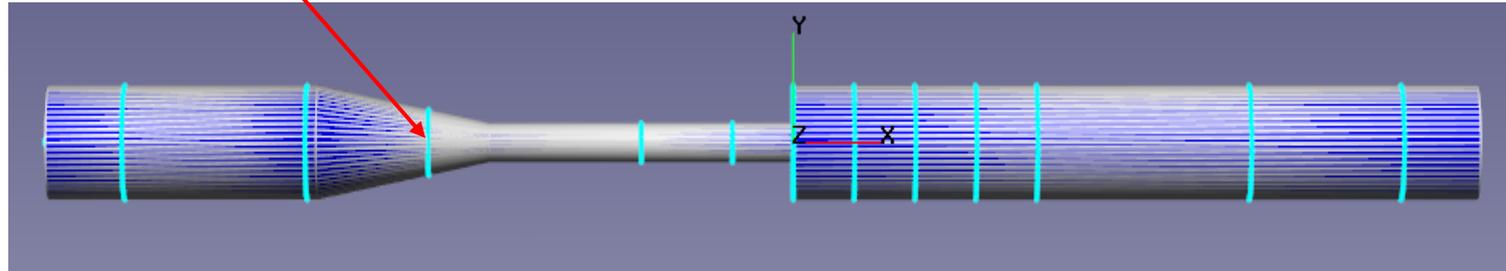
Re = 500



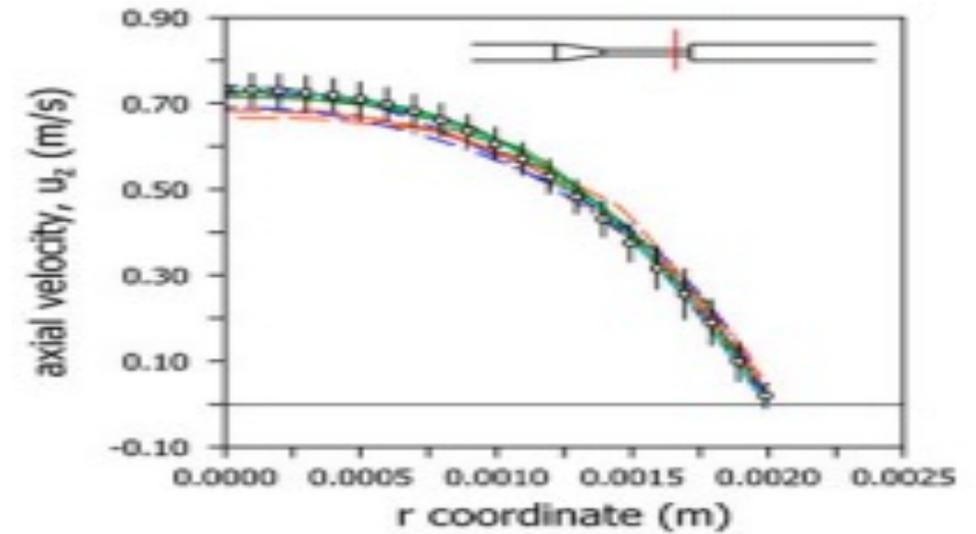
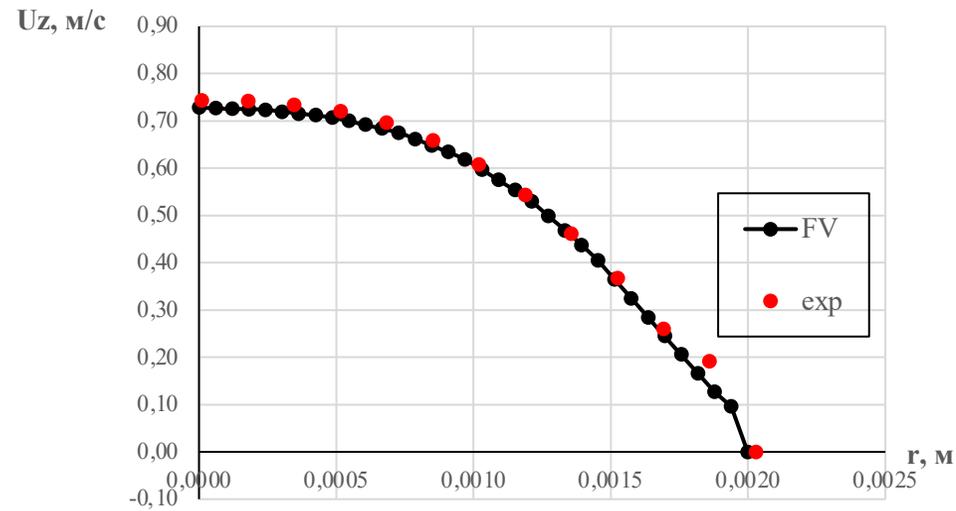
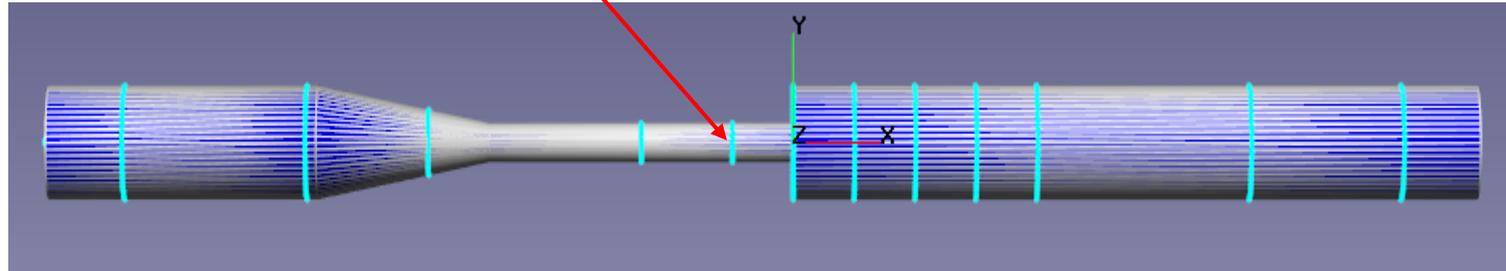
$z = -0,08 \text{ m}$



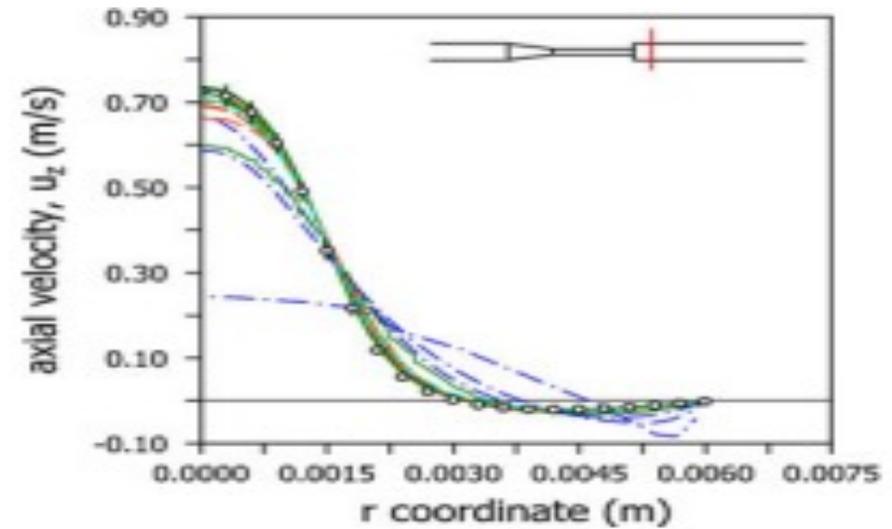
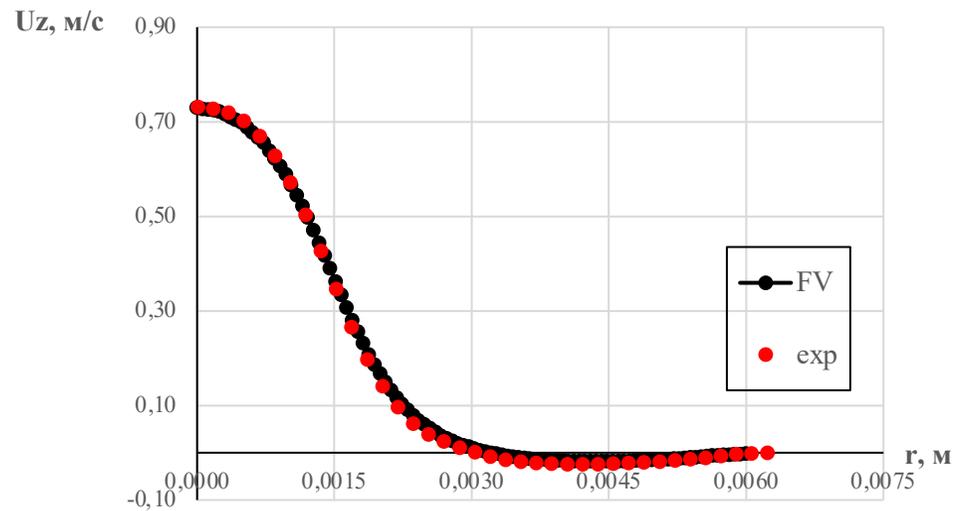
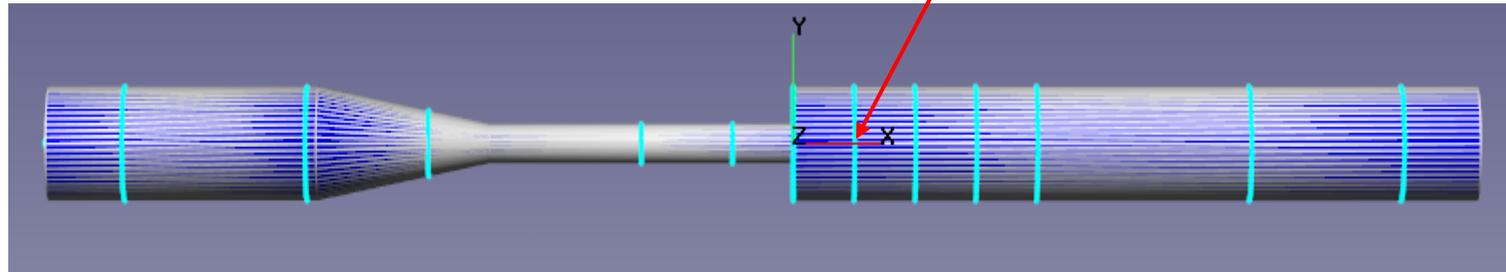
$z = -0,048 \text{ m}$



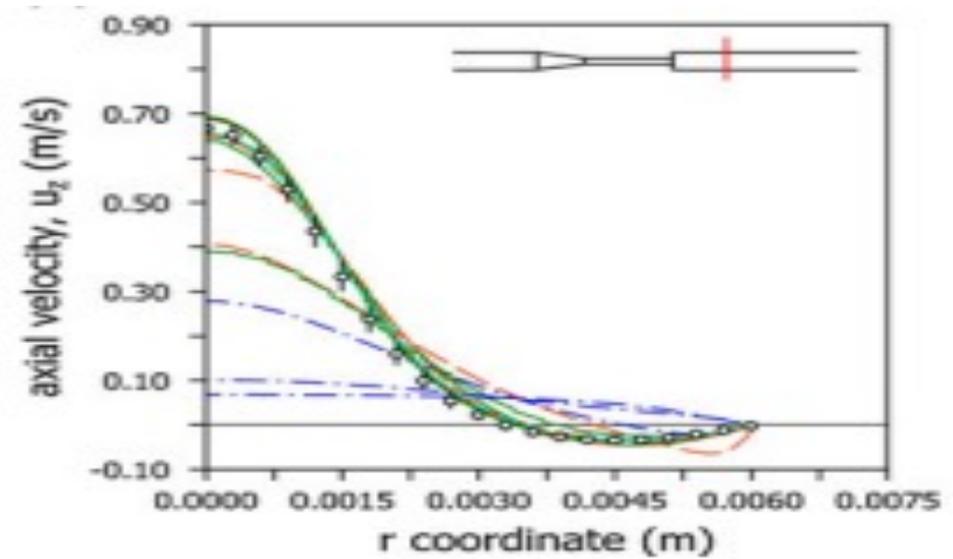
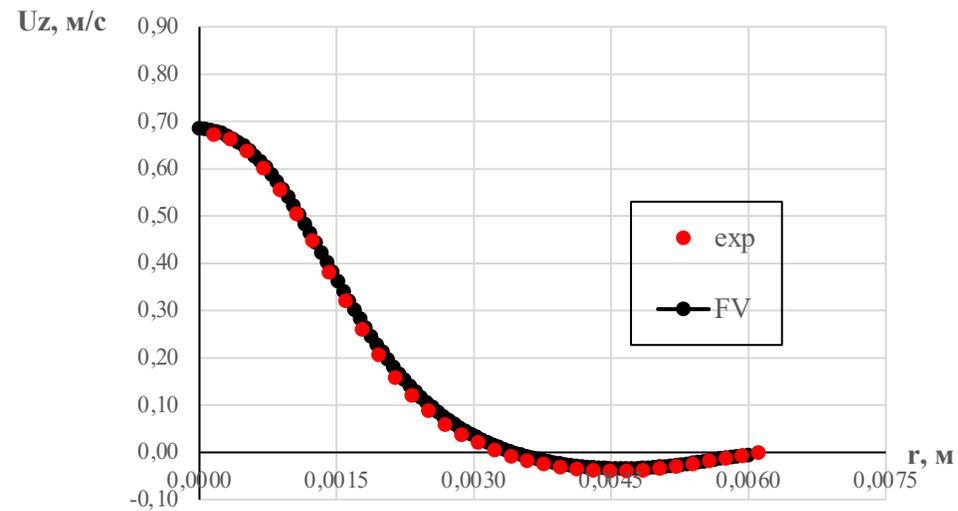
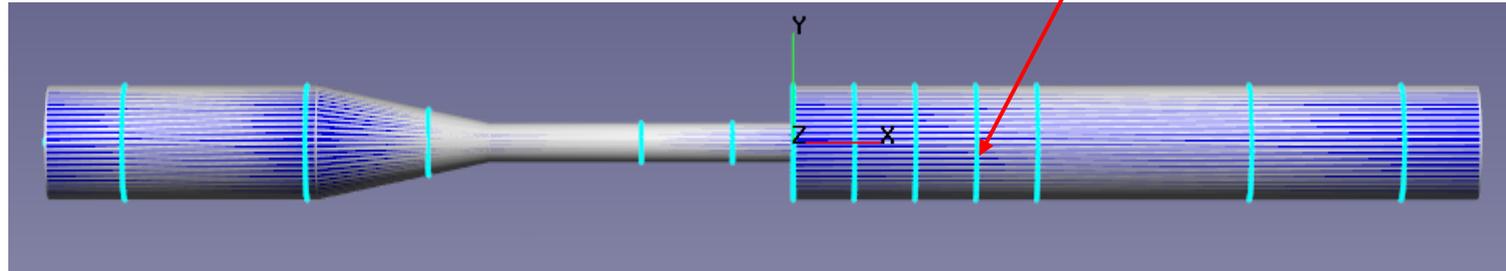
$z = -0,008 \text{ m}$

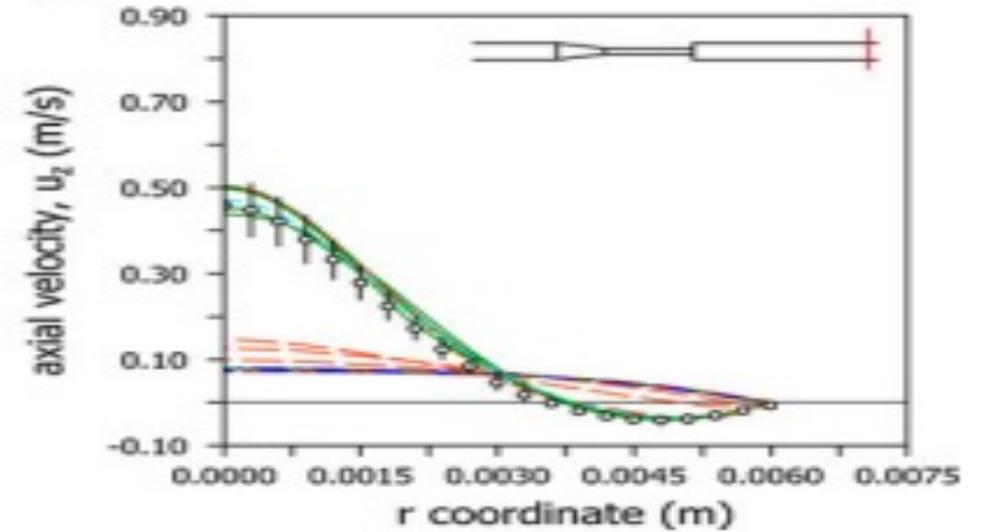
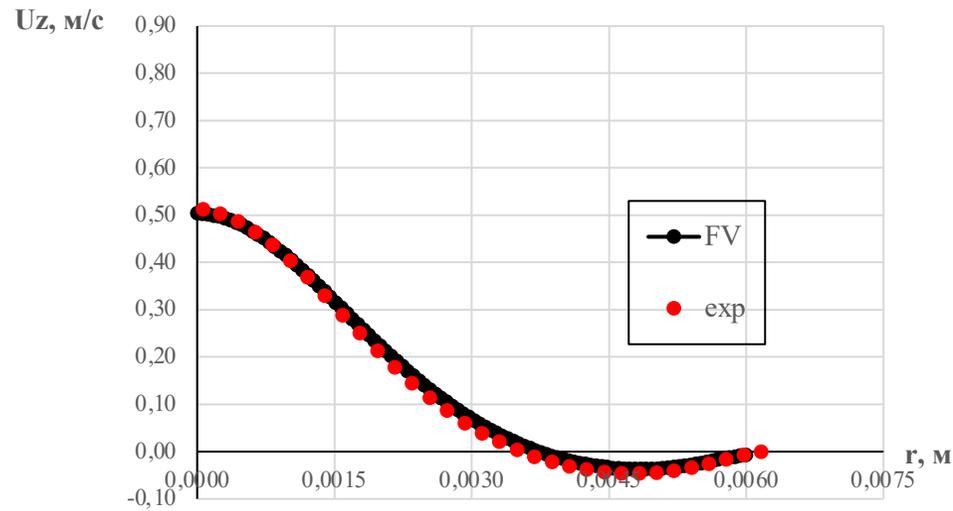
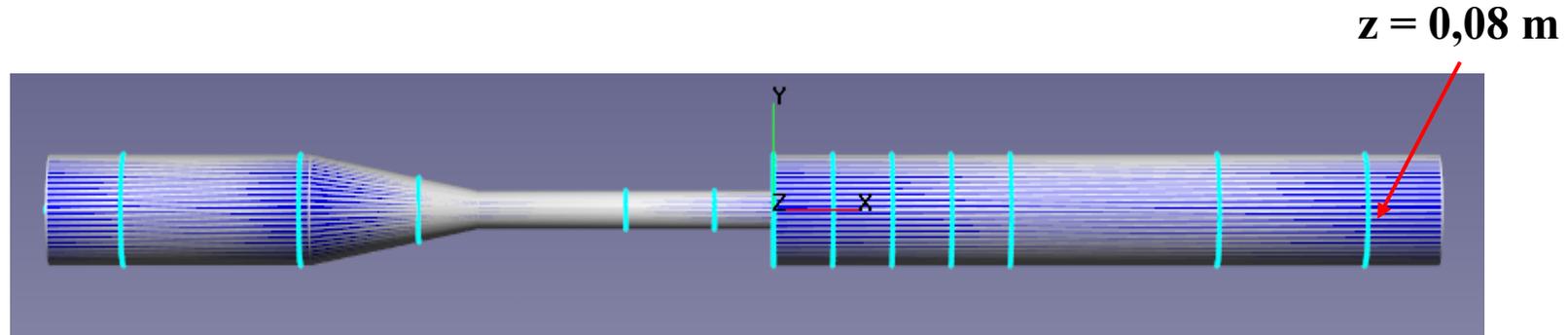


$z = 0,008 \text{ m}$



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



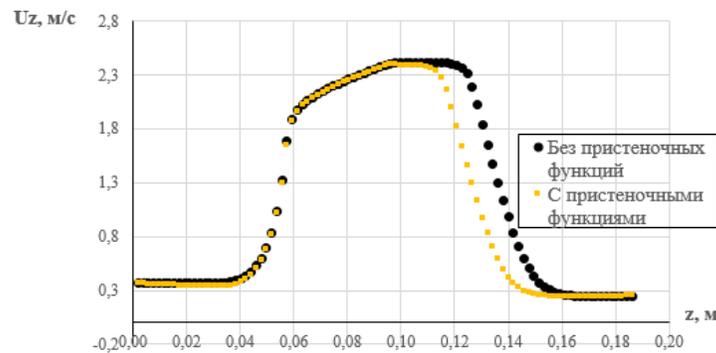


Заключение

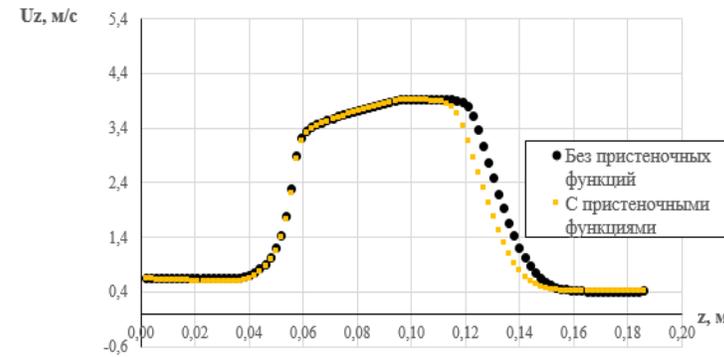
1. Значения скорости в направлении координаты z и в поперечных сечениях имеют хорошее согласование с результатами эксперимента.

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.

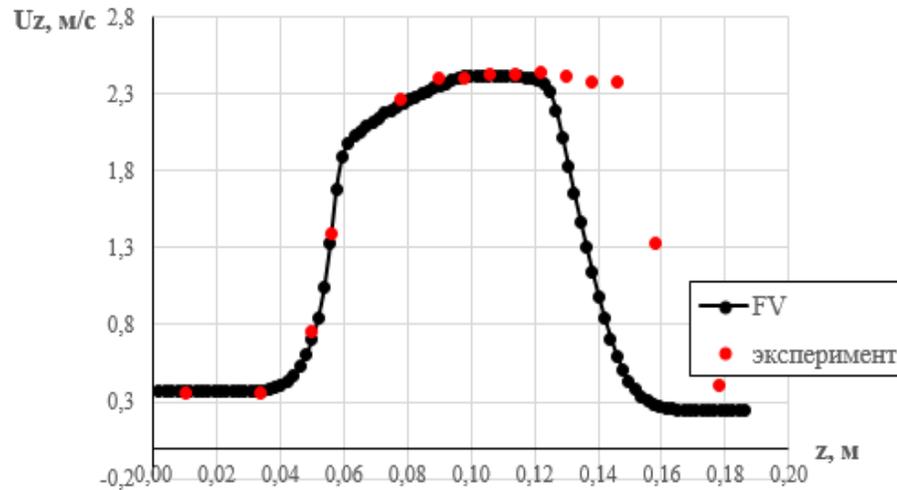


а) $Re_t = 2000$

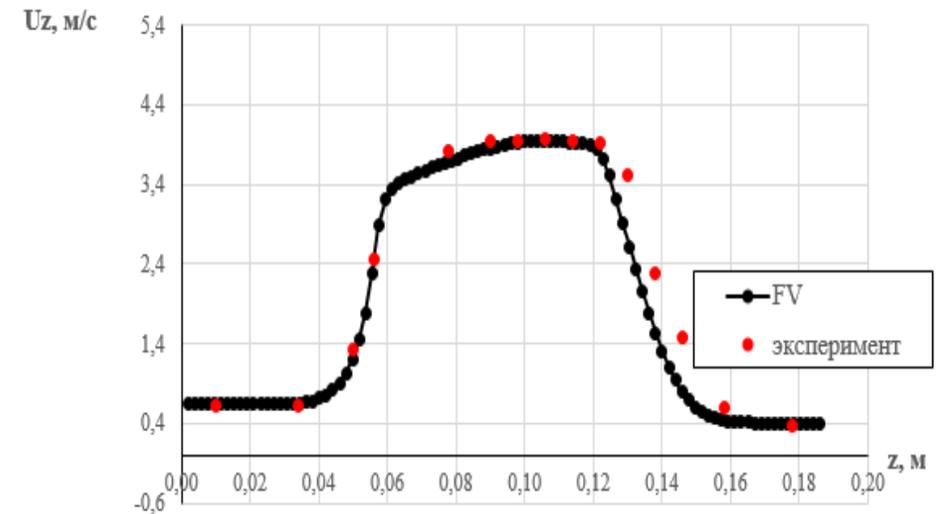


б) $Re_t = 3500$

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

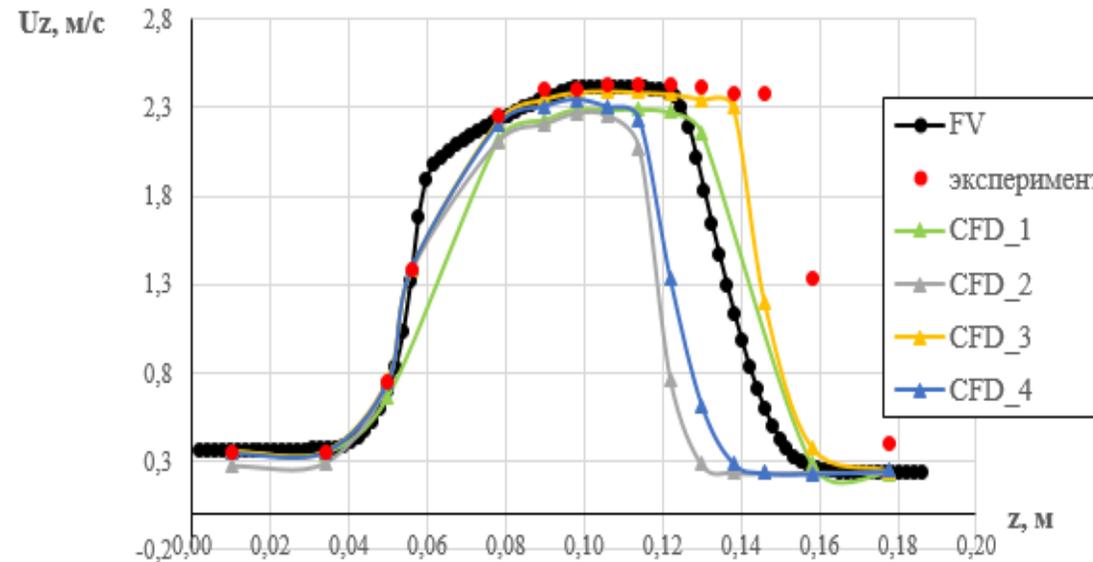


а) $Re_t = 2000$

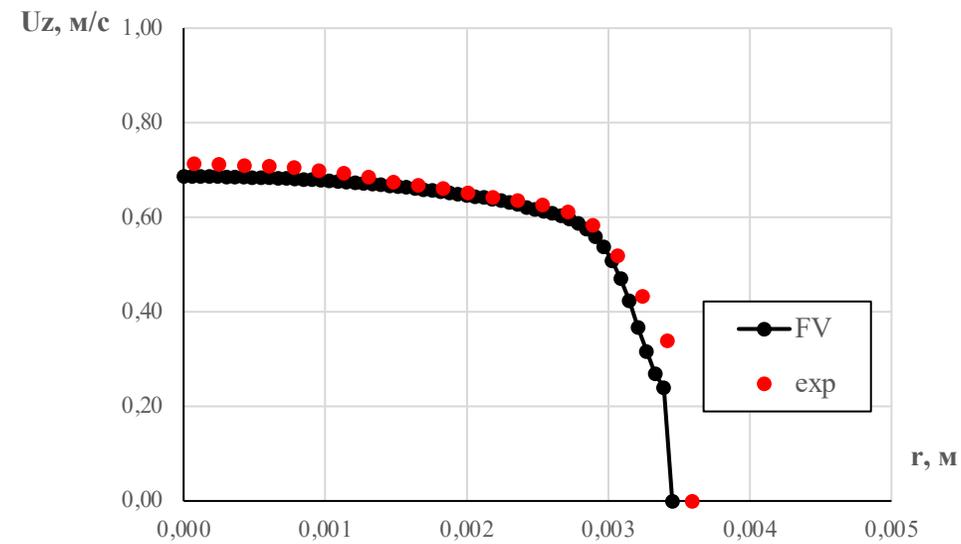
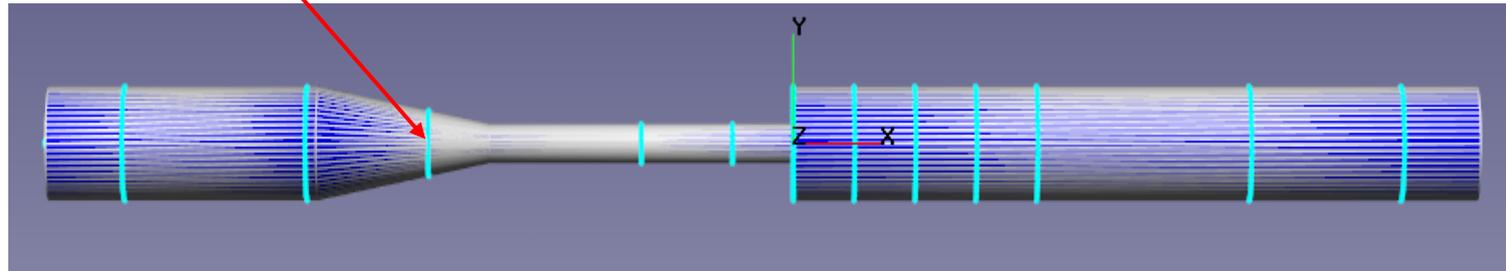


б) $Re_t = 3500$

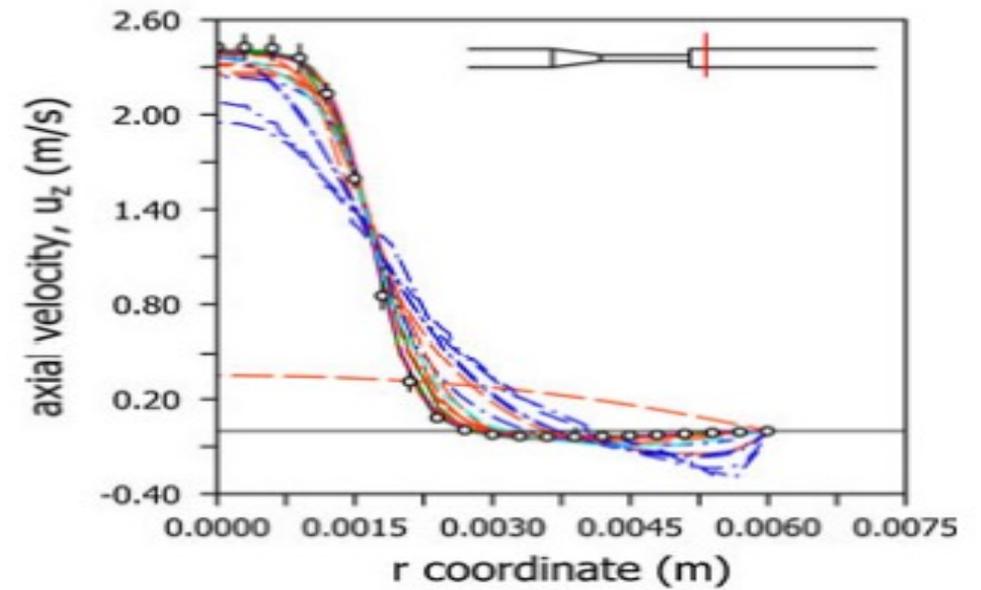
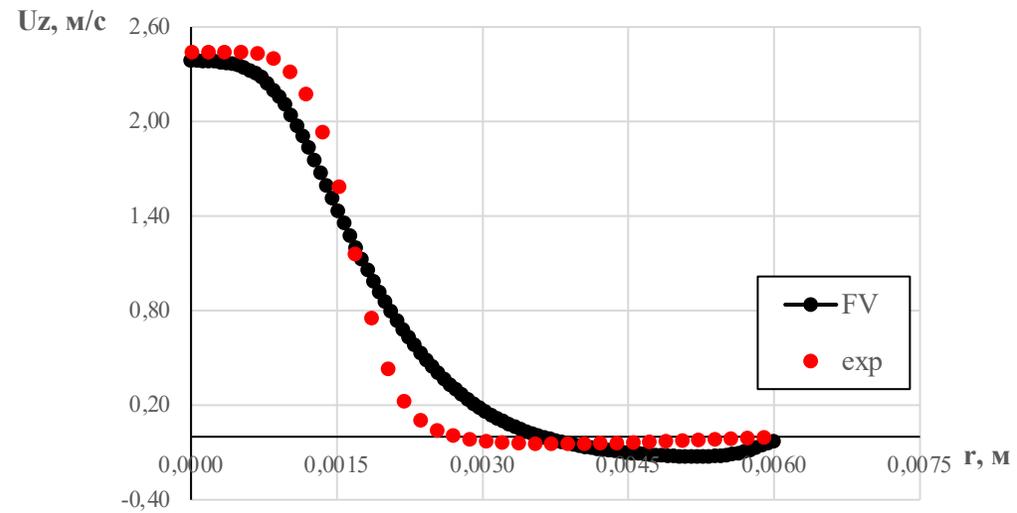
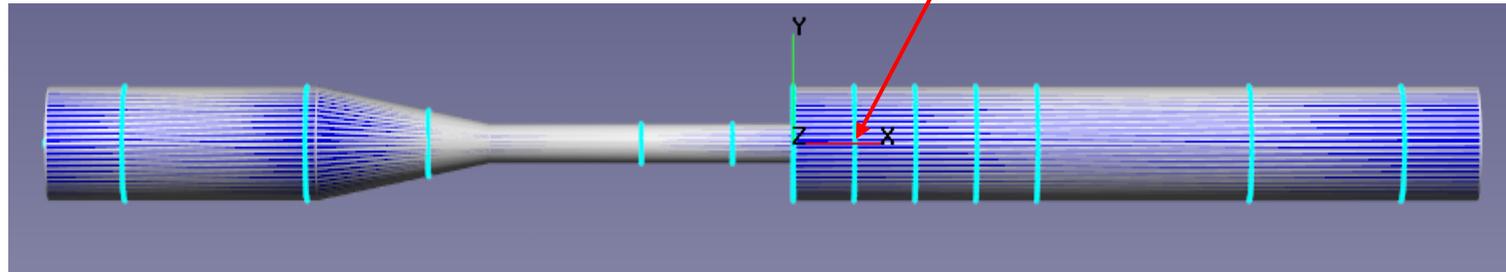
При $Re_t = 2000$ расхождения с экспериментальными данными не больше полученных в других пакетах. Результаты численного моделирования, полученные в других программных комплексах, обозначены как CFD_1 - CFD_4.



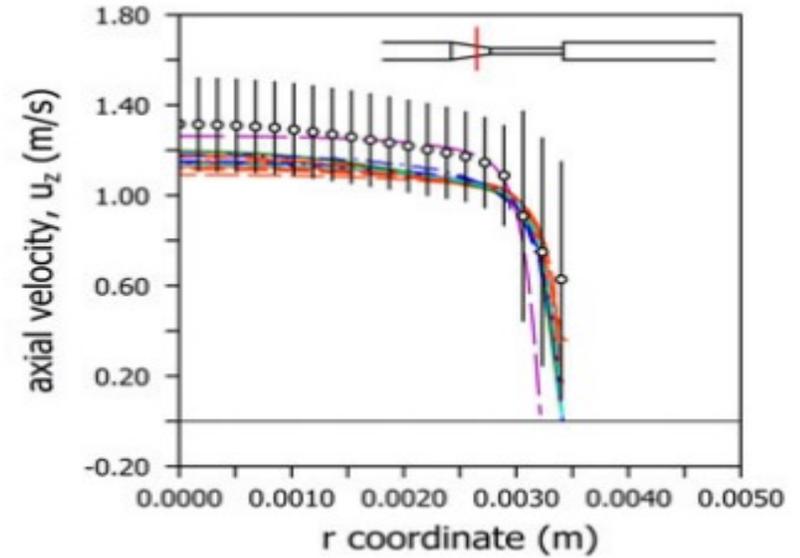
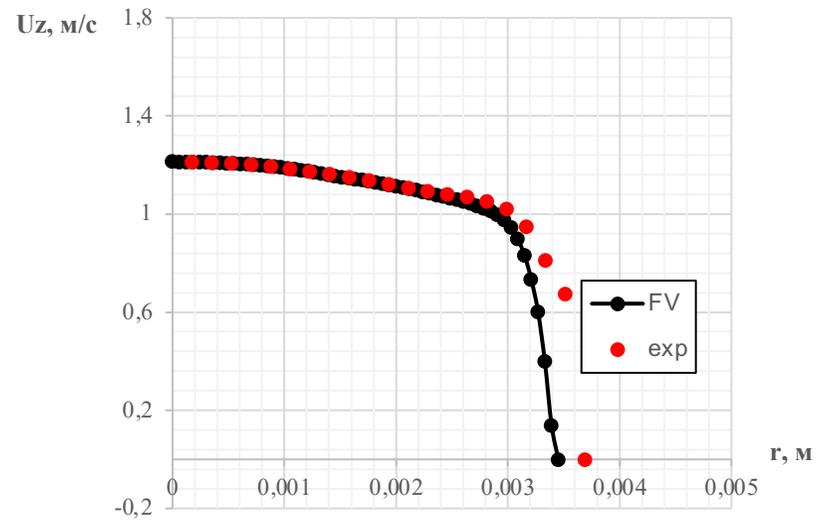
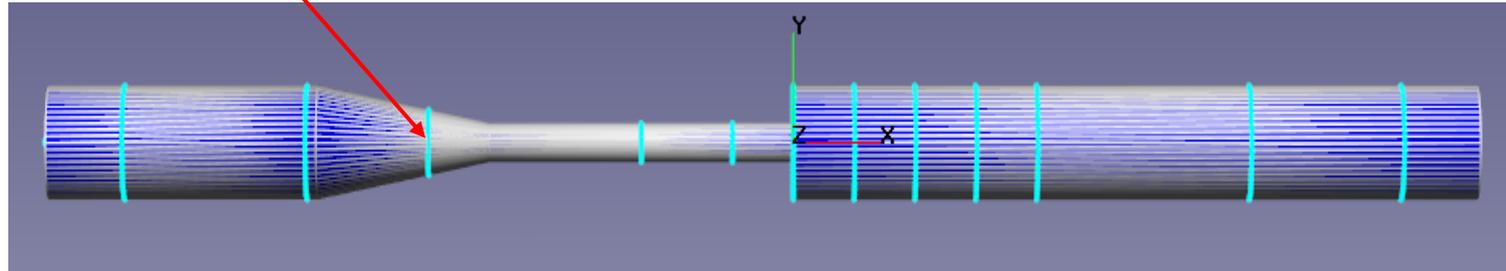
$z = -0,048 \text{ m}$



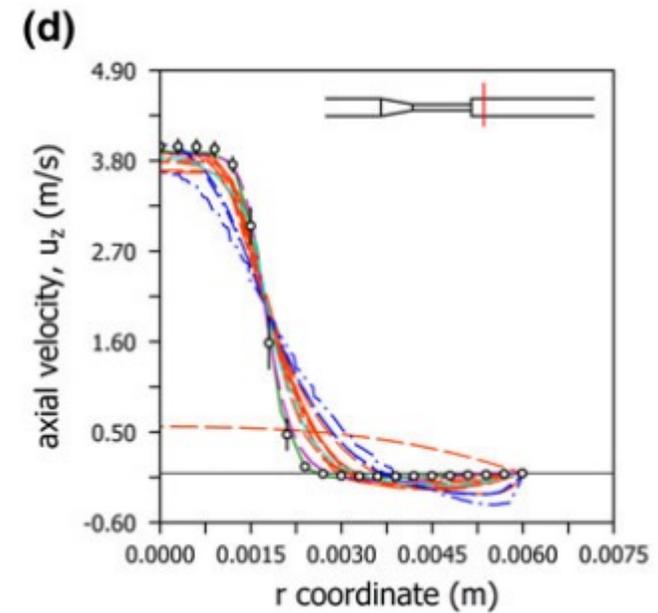
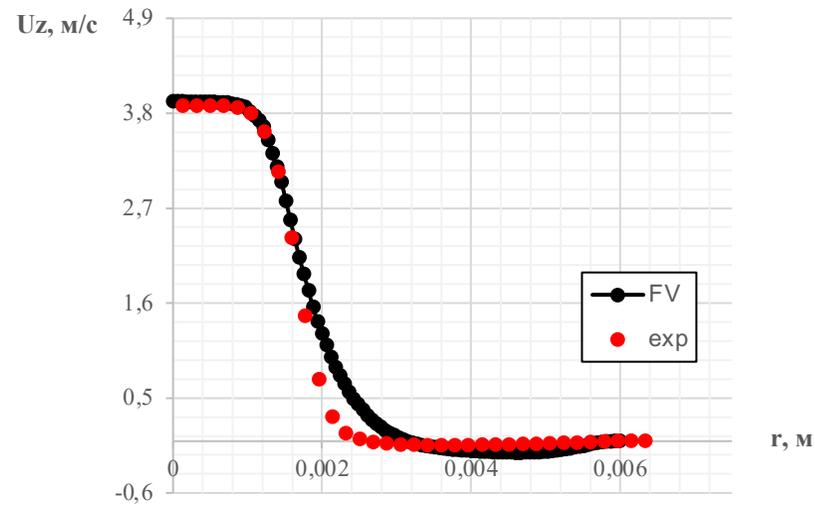
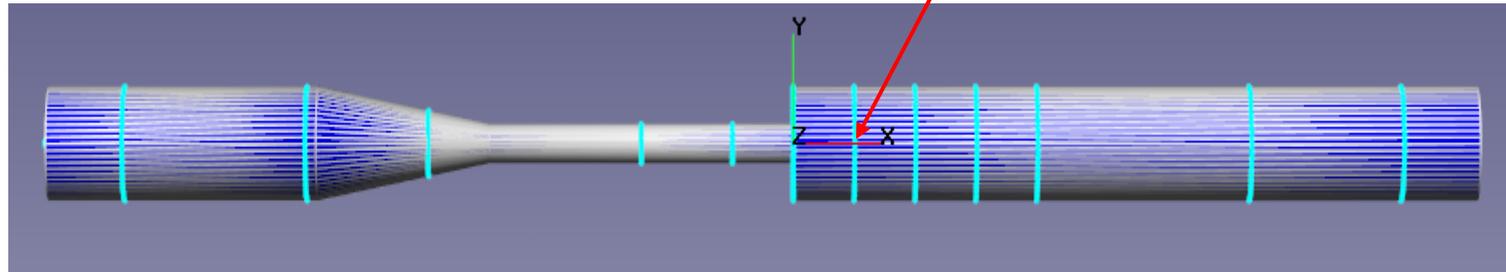
$z = 0,008 \text{ m}$



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



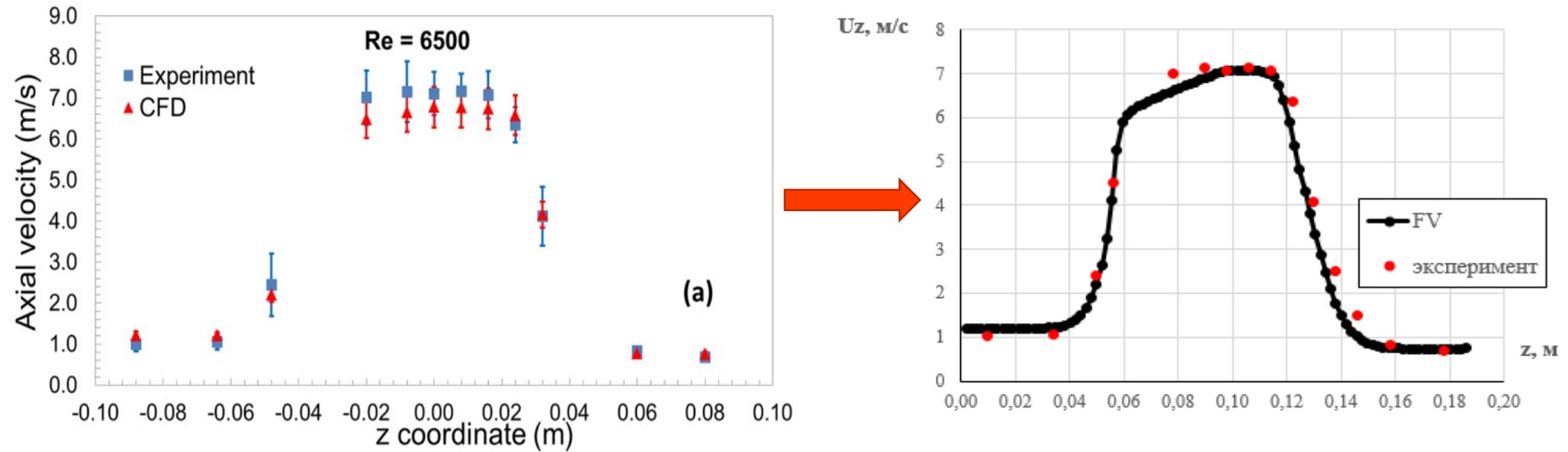
$z = 0,008 \text{ m}$



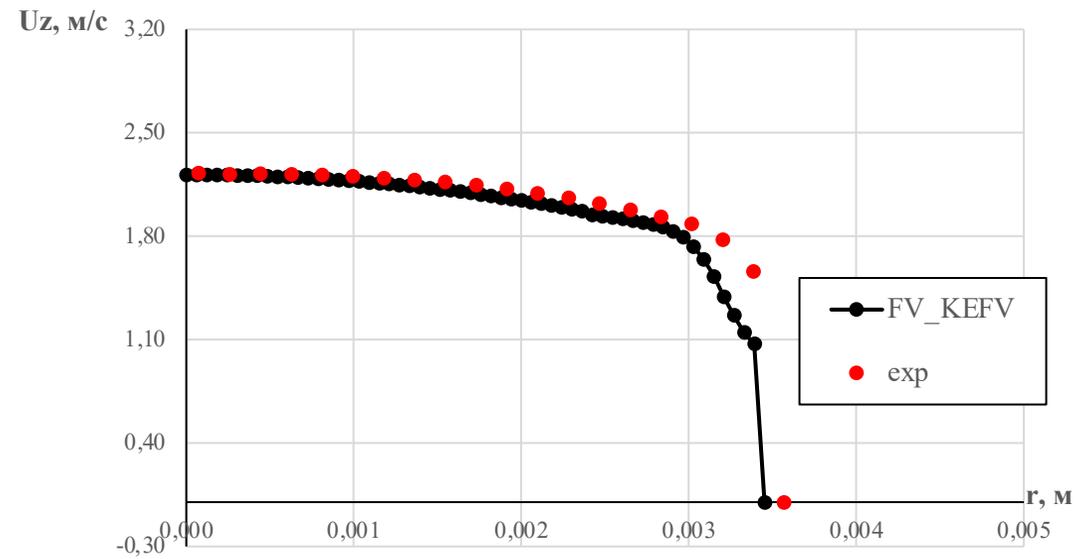
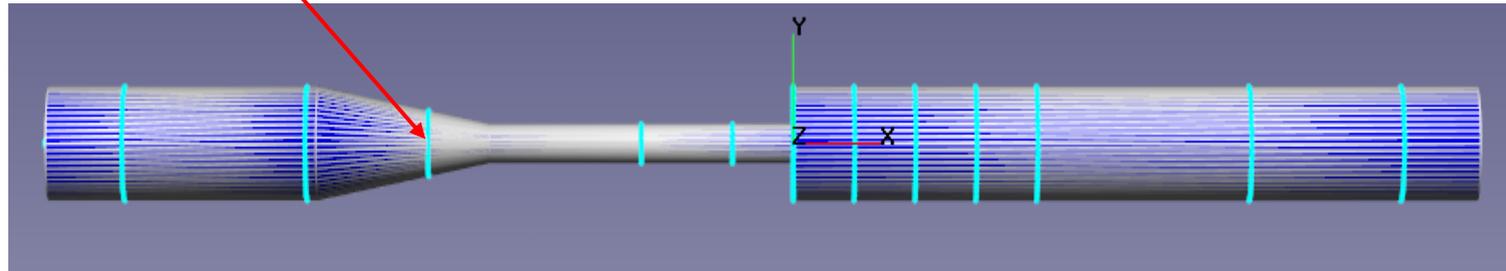
Заключение

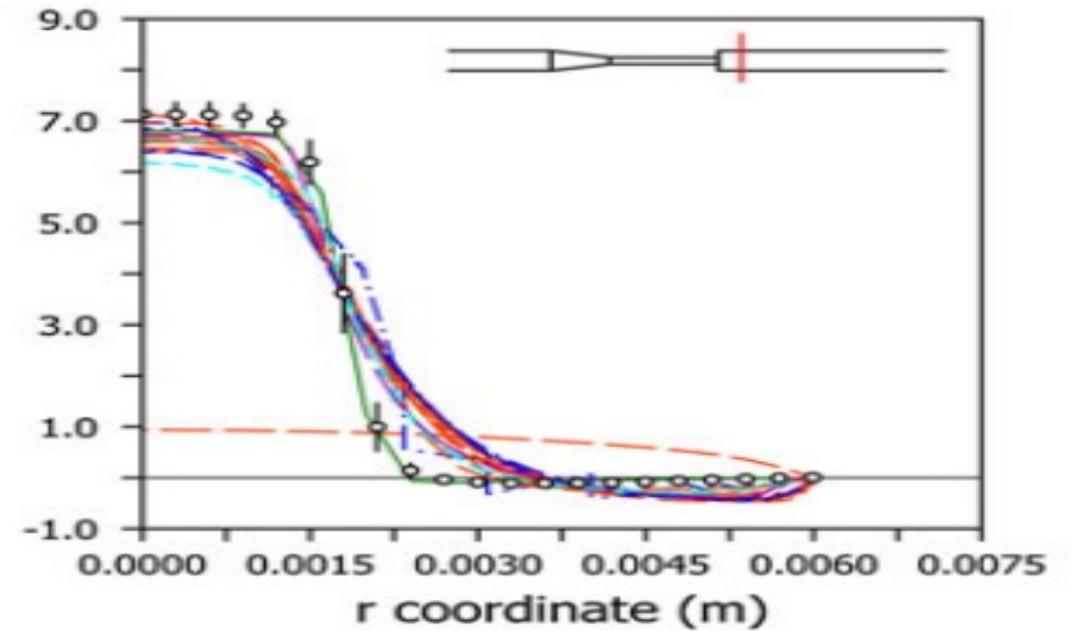
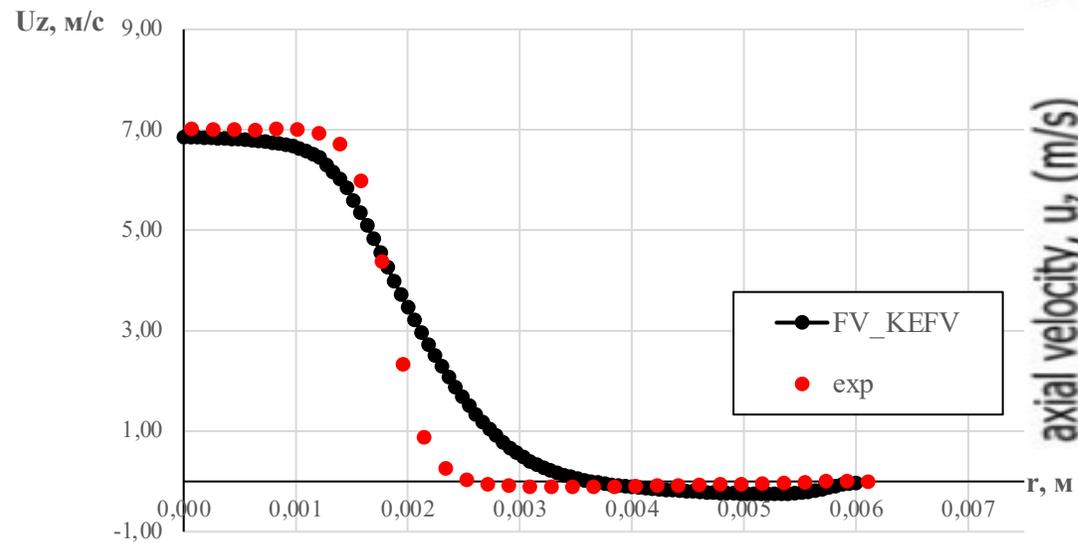
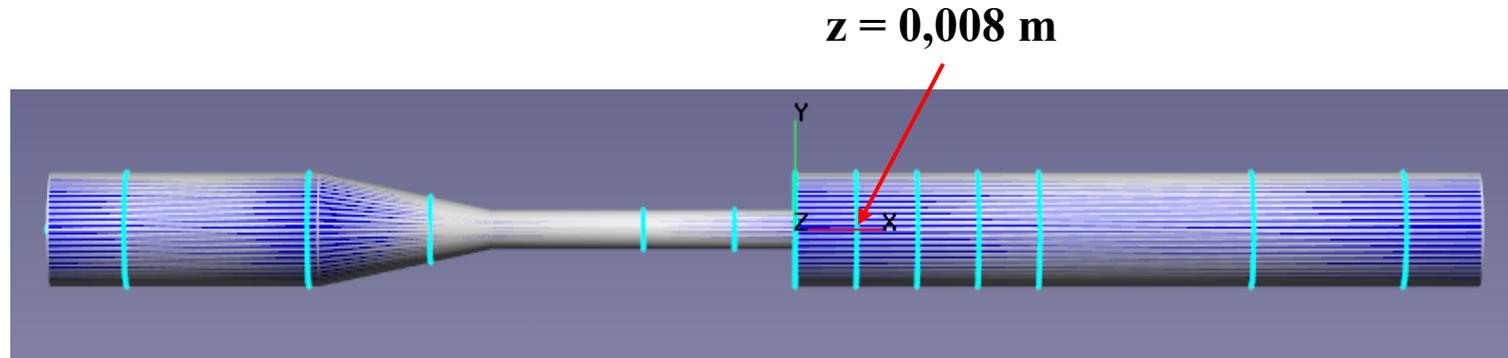
1. При $Re = 2000$ значения скорости в направлении координаты z и в поперечных сечениях имеют значительные отличия от экспериментальных данных после резкого расширения сопла, однако соответствуют аналогичным расчетам в других программных комплексах.
2. При $Re = 3500$ значения скорости в направлении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

Re = 6500



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



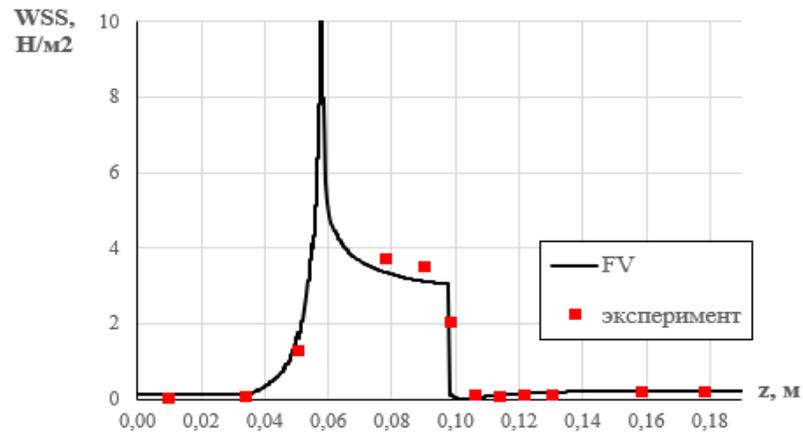


Заключение

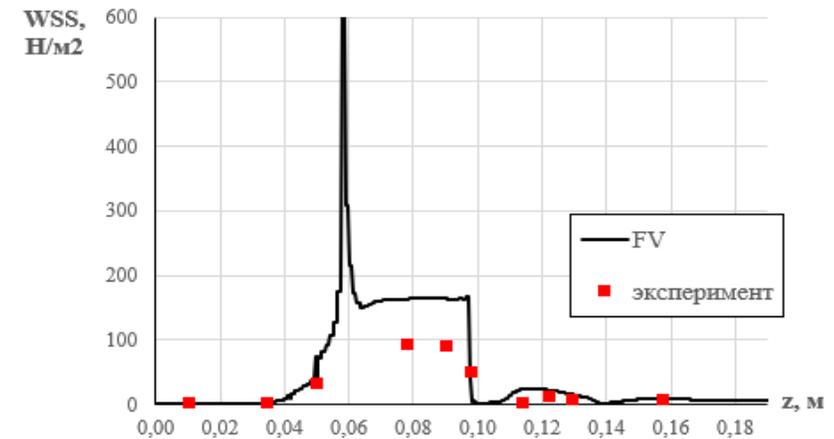
1. Наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными.

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.

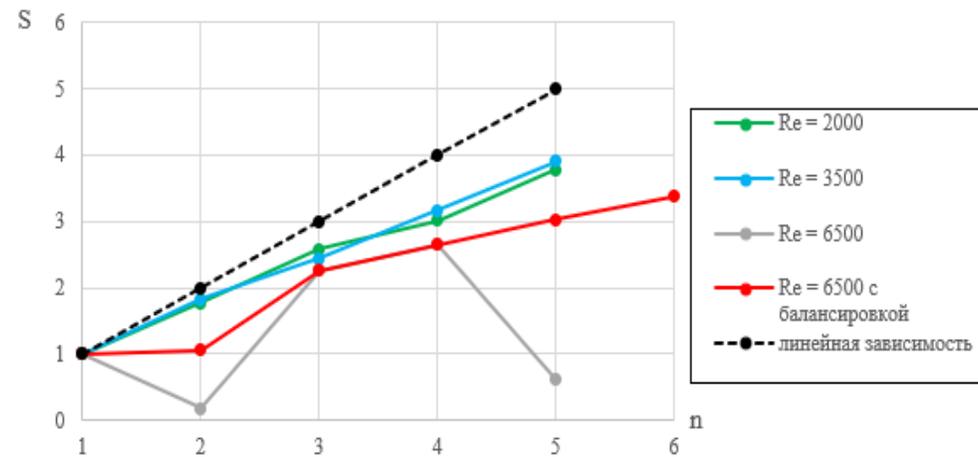


а) $Re_t = 500$



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!