

Тема работы:

Численное исследование гемодинамических эффектов в сосудистых протезах.

Состав коллектива исполнителей:

- Борисов Владимир Геральдович, кафедра фундаментальной математики, Кемеровский государственный университет, кандидат физико-математических наук.
- Захаров Юрий Николаевич, заведующий кафедрой Юнеско по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет доктор физико-математических наук.
- Клышников Кирилл Юрьевич, научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов ФГБНУ «НИИ Комплексных проблем сердечно сосудистых заболеваний», кандидат технических наук.
- Овчаренко Евгений Андреевич, заведующий лабораторией новых биоматериалов ФГБНУ «НИИ Комплексных проблем сердечно сосудистых заболеваний», кандидат технических наук.

Научное содержание работы:

Работа является продолжением исследования, описанного в отчете kemsu_vgborisov_2018_10.pdf.

Выполняются численные расчеты полей скорости течения в трех образцах биопротезов, имеющих множественные стенозы. В зонах стенозов и вне их анализируется распределение пристеночного напряжения сдвига, влияющего на факторы риска возникновения тромбоза в протезе. Проводится сравнительный анализ характеристик течения крови и рисков факторов возникновения тромбоза для рассматриваемых биопротезов.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:

1. Математическая модель

Рассматривались три модели биопротезов со стенозами различных степеней в областях швов. Изображения их внутренних стенок в двух проекциях приведены на рисунке 1. Зоны стенозов отмечены на рисунке двумя цифрами.

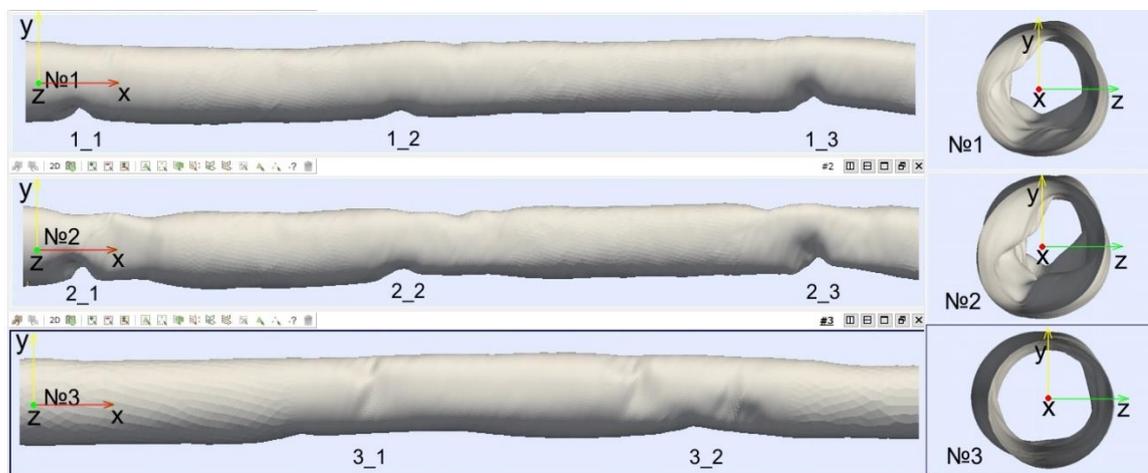


Рис. 1. Внутренние стенки исследуемых протезов в продольной и поперечной проекциях.

Вычислялись степени стенозов для каждой области сшивки.

Для получения осесимметричного параллельного потока на входе в исследуемую область и уменьшения влияния краевых условий на картину течения в ней, модели каждого из протезов были продолжены цилиндрическим образом вдоль оси Ox вправо и влево до длины равной 14 см. Далее на всех рисунках изображены проекции только исходных протезов (цилиндрические продолжения не отображаются).

Внутренняя область протеза ниже обозначается через Ω , входное и выходное сечения – через Γ_1 и Γ_2 , соответственно, боковая поверхность – через Γ_3 . Границы области Ω считались жесткими. Рассматривалось нестационарное течение крови в виде установившихся периодических пульсовых колебаний, вызванных периодически изменяющейся разностью давления между Γ_1 и Γ_2 . Давление на границе Γ_2 полагалось равным нулю, а на Γ_1 задавались периодические пульсовые колебания давления с временной зависимостью, изображенной на рисунке 2. На рисунке изображен один период сердечного цикла с частотой пульса 60 ударов в минуту. По оси абсцисс откладывается время в секундах, по оси ординат – давление в миллибарах.

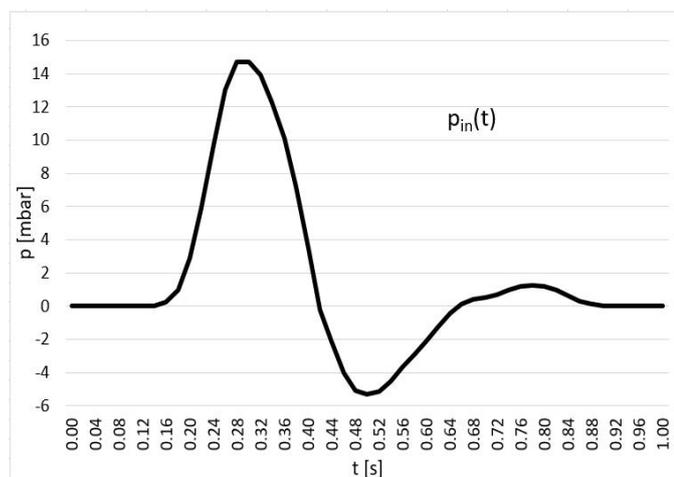


Рис. 2. График зависимости от времени давления на входе протеза.

На границах Γ_1 и Γ_2 ставилось условие параллельности вектора скорости оси Ox , а на границе Γ_3 – условие непротекания.

Кровь считалась ньютоновской жидкостью с плотностью $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$, и динамической вязкостью $\mu = 3.675 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Течение крови в области Ω описывалось трехмерными уравнениями Навье-Стокса для давления p и скорости U :

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U,$$
$$\nabla U = 0.$$

Моделировалось установившееся периодическое течение, вызванное периодически изменяющейся разностью давления между входом и выходом в сосуд.

Численные расчеты поставленной задачи выполнялись методом конечных объемов на тетраэдральных сетках Netgen, построенных в ПП Salome. Решение сеточных уравнений проводилось в программном комплексе OpenFoam с помощью алгоритма PISO. Для постпроцессинга и визуализации результатов использовался ПП ParaView. На боковых поверхностях сосудов постпроцессингом вычислялось пристеночное напряжение сдвига (WSS), как касательная к боковой поверхности сосуда составляющая тензора напряжения сдвига $\mu \nabla^2 U$.

Полученные результаты:

Проводилось сравнение качественных и количественных характеристик течения в зонах стенозов. На рисунке 3 изображено распределение модуля вектора скорости на систолическом пике скорости течения для трех сосудов.

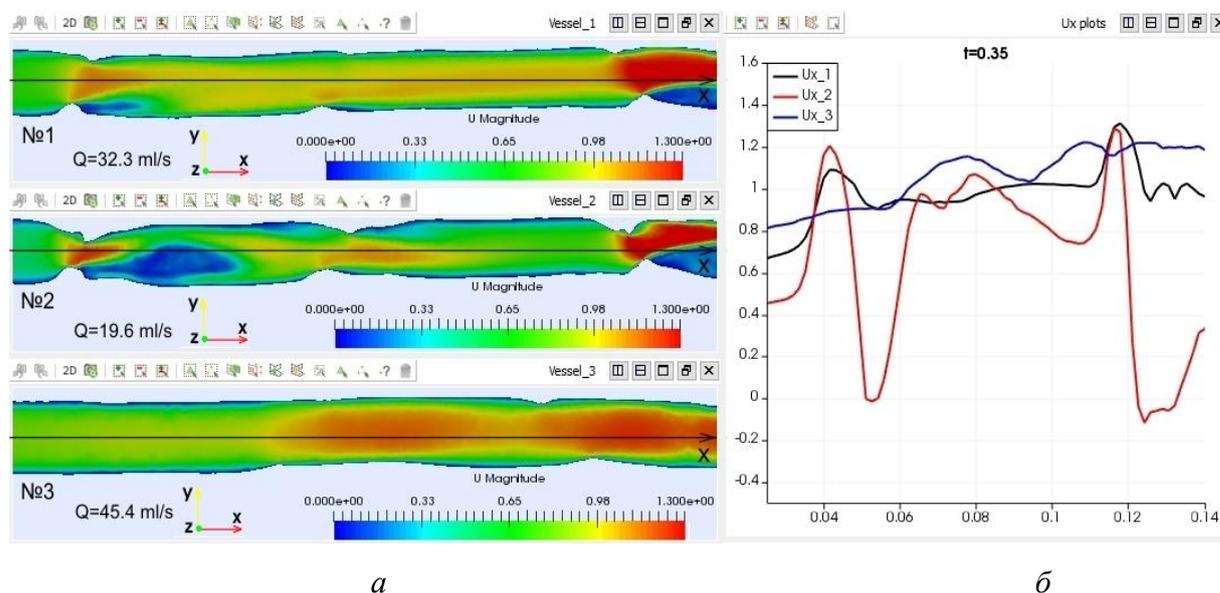


Рис. 3. Распределение $|U|$ в продольном сечении для сосудов №1-№3 (а) и графики значений U_x на оси Ox при $t=0.35$ (б).

По полученным численным результатам были сделаны выводы о сравнительных качественных и количественных характеристиках течения на различных фазах сердечного цикла.

Анализировались пиковые и средние по периоду сердечного цикла значения WSS в окрестностях стенозов сосудов. На рисунке 4а приведены изображения распределения WSS в зонах стенозов 1_1, 2_3, 3_2 при максимальном значении скорости потока ($t = 0.35$ с). Цветовая шкала на рисунке 4а соответствует интервалу изменения напряжения сдвига от 0 (синий цвет) до 7 Па (красный). На рисунке 4б изображены графики зависимости WSS от t , вычисленные в местах наиболее значимых стенозов каждого из сосудов, помеченных черными точками на рисунке 4а. Черная линия графика на рисунке 4б соответствует

стенозу 1_1, красная – стенозу 2_3, синяя – стенозу 3_2. По оси ординат откладывается величина напряжения сдвига в Па, по оси абсцисс – время в секундах.

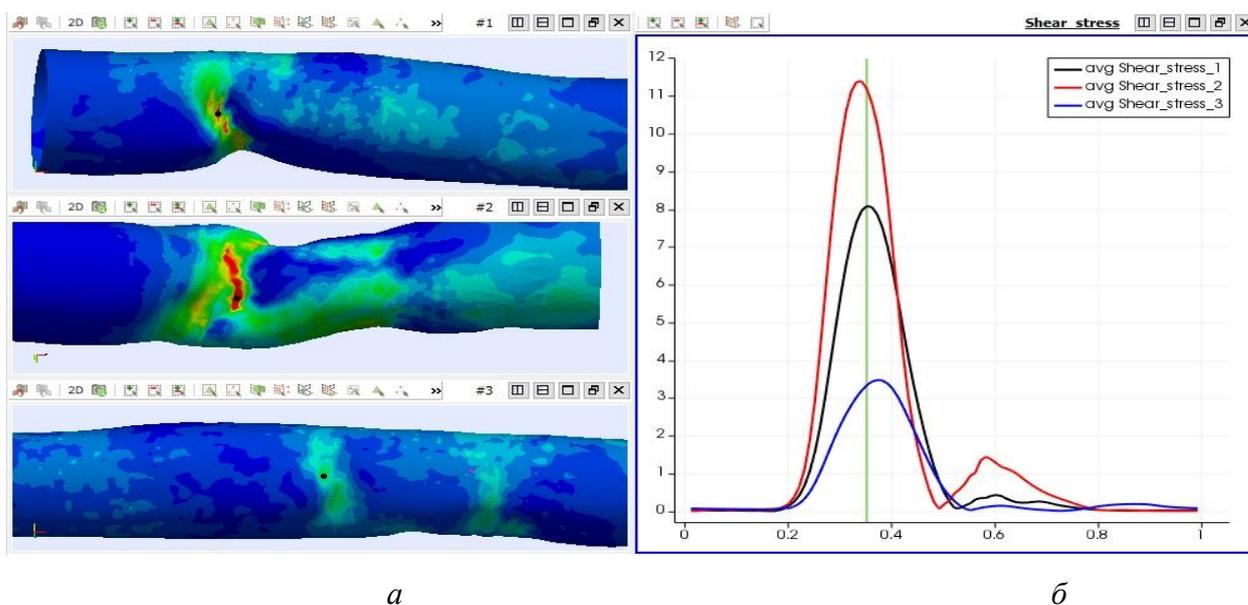


Рис. 4. Распределение WSS при $t = 0.35\text{c}$ (а) и графики зависимости WSS от t (б).

Пиковые значения WSS оценивались на их близость к критическому значению, связанному с т. н. фактором Фон Виллебранда (vWF), при достижении которого у пациента может развиваться тромбоз сосуда. Из полученных расчетных данных следует, что для стеноза 3_2 пиковое значение WSS находится в пределах нормы, для стеноза 1_1 – несущественно превосходят норму, а пиковое значение WSS для стеноза 2_3 близко к критическому значению, связанному с фактором vWF.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Доступ к кластеру НГУ использовался для численных расчетов в пакете OpenFOAM. С помощью расчетов, выполненных на кластере было существенно сокращено время численных расчетов, что позволило провести более полное исследование поставленной задачи.

Публикация, содержащая результаты работы:

Борисов В.Г. и др., Численный метод прогнозирования гемодинамических эффектов в сосудистых протезах, Сибирский журнал вычислительной математики. 2019. Т.22. №4, С. 381-397. DOI: 10.15372/SJNM20190401