

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МУЛЬТИМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ РЕСТЕНОЗА ISR3D НА ОСНОВЕ КЛИНИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Фотин А.Д. (Университет ИТМО),

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук, Бухановский А.В,
PhD, Зун П.С. (Университет ИТМО).

Введение. Для лечения атеросклероза существует довольно действенный терапевтический метод – баллонная ангиопластика с установкой стента. Однако, помимо вытеснения бляшки из просвета и восстановления кровотока сосуда, баллонная дилатация также оголяет эндотелиальный слой и повреждает стенку сосуда. Далее запускаются биологические процессы восстановления поврежденных тканей, пролиферация и миграция гладкомышечных клеток, формирование внеклеточного матрикса, воспаления, агрегация тромбоцитов [1,2]. Такие процессы часто приводят к росту неоинтимы в просвете сосуда, новообразованной ткани, состоящей в основном гладкомышечных тканей и внеклеточного матрикса. Чрезмерное разрастание неоинтимы приводит к повторному сужению сосуда [3], патологии, известной как рестеноз в стенке или "in-stent restenosis" (ISR). Для изучения и прогнозирования развития рестеноза существует мультимасштабная агентная модель рестеноза ISR3D [4].

Основная часть. Для верификации и валидации модели рестеноза требуется подготовить клинические данные для запуска модели и анализа выходных данных. Предоставленные данные для исследования представляют собой небольшую выборку, где для каждого случая известны: две поверхности сосуда, восстановленные по результатам оптической когерентной томографии, сразу после стентирования и через несколько лет, биологические показатели для каждого случая, тип и параметры установленного стента.

Для воссоздания геометрии сосуда был разработан скрипт на python, с использованием библиотек `vtk`, `vmkt`, `pygalmesh`. Скрипт можно разбить на два модуля. Первый читает начальные файлы геометрии, определяет центральную линию сосуда, дублирует внутреннюю стенку сосуда со смещением от центральной линии на величину равную средней толщине сосуда, замыкает две поверхности и разбивает их на тетраэдрические элементы. Вторым равномерно заполняет каждый тетраэдр агентами, и сохраняет полученные данные в файл. Однако, по результатам оптической когерентной томографии невозможно определить типы тканей и даже установленный стент. На данный момент агенты разбиваются на три типа тканей: медиа, внутренний и внешний эндотелиальный слой, без учета материала стента.

Также стоял вопрос учета динамики во время установки стента и при воздействии кровяного давления. Существуют хорошие, проверенные механические конечно-элементные модели баллонной ангиопластики с установкой стента, например в работе [5] рассматривается модель гиперэластичного повреждения, откалиброванная с помощью экспериментальных результатов, которая используется для описания осевых напряжений артериальных слоев и бляшек. Для учета смещения сосуда, был реализован алгоритм переноса результатов из конечно-элементной модели в агентную. Из результатов конечно-элементной модели нас интересуют только смещения узлов конечных элементов. Используя эти данные, можно определить смещения для каждого агента в модели. Для этого была использована трилинейная интерполяция. Сравнивая результаты конечно-элементной модели и агентной, было получено, что кольцевое и осевое напряжения сосуда при агентном моделировании совпадают с результатами конечно-элементной модели, однако есть существенные различия в радиальном напряжении, возможно это связано с не сжимаемостью в условиях конечно-элементной модели.

Выводы. В результате работы были предприняты некоторые шаги по верификации модели рестеноза ISR3D. Разработан скрипт по преобразованию клинических данных о геометрии

сосуда для использования их в модели. Разработан алгоритм переноса смещений из конечно-элементной модели в агентную, проведено сравнение напряжений, возникающих при стентировании сосуда и кровяного давления.

Список использованных источников:

1. Jukema, J. W., Verschuren, J. J. W., Ahmed, T. A. N., & Quax, P. H. A. (2012). Restenosis after PCI. Part 1: pathophysiology and risk factors. *Nature Reviews Cardiology*, 9(1), 53–62.
2. Jukema, J. W., Ahmed, T. A. N., Verschuren, J. J. W., & Quax, P. H. A. (2012). Restenosis after PCI. Part 2: prevention and therapy. *Nature Reviews Cardiology*, 9(2), 79–90.
3. Torrado, J., Buckley, L., Durán, A., Trujillo, P., Toldo, S., Valle Raleigh, J., Abbate, A., Biondi-Zoccai, G., & Guzmán, L. A. (2018). Restenosis, Stent Thrombosis, and Bleeding Complications: Navigating Between Scylla and Charybdis. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(15), 1676–1695.
4. Ye, D., Zun, P., Krzhizhanovskaya, V., & Hoekstra, A. G. (2022). Uncertainty quantification of a three-dimensional in-stent restenosis model with surrogate modelling. *Journal of the Royal Society Interface*, 19(187).
5. He, R., Zhao, L. G., Silberschmidt, V. v., Liu, Y., & Vogt, F. (2020). Finite element evaluation of artery damage in deployment of polymeric stent with pre- and post-dilation. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 19(1).

Фотин А.Д. (автор)

Подпись

Зун П.С. (научный руководитель)

Подпись