

## Моделирование системного артериального русла человека

Зенин О.К.<sup>1</sup>, Кизилова Н.Н.<sup>2</sup>, Филиппова Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный медицинский университет, Украина

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет, Украина

Математическое моделирование сердечно-сосудистой системы человека представляет огромный интерес для понимания закономерностей распределения кровотока, распространения пульсовых волн, влияния напряжения сдвига на стенке на регуляцию кровотока и развитие сосудистых патологий. Модель сердечно-сосудистой системы является важнейшей компонентой международного приоритетного проекта Virtual Physiological Human, позволяющей проводить в реальном времени для конкретного пациента компьютерную диагностику, планирование операций, выбор терапевтического воздействия, прогнозирование результатов лечебных мероприятий и реабилитацию. На сегодняшний день основой модели русла системных артерий является модель, состоящая из 55 сосудов, параметры которых были измерены N.Westerhof (1968) на трупном материале и имеют значительные погрешности. В результате уточнения данных Westerhof несколькими исследовательскими группами была получена база данных для 90-120 крупных артерий, на основе которой проводились многочисленные расчеты параметров гемодинамики в норме и при сердечно-сосудистых патологиях.

В данной работе представлены результаты детальных измерений параметров системных артерий от аорты до питающих артерий внутренних органов и мышц вплоть до места их входа в соответствующий орган. Измерения были проведены на 5 трупах и соответствующие базы данных содержат 600-900 артерий. Измерялись длины и диаметры артериальных сегментов, рассчитывались толщины и модули упругости материала стенок. Внутриорганные и внутримышечные артериальные русла исследовались путем заполнения русел изъятых органов жидкой пластической массой, после застывания которой получался слепок русла, включающий артерии вплоть до  $d=0.1$  мм. Кроме этого, были проведены УЗ-измерения параметров 80 крупных системных артерий на 5 здоровых добровольцах.

Путем статистического анализа данных были получены закономерности строения сосудистых бифуркаций. Показано, что регрессионные соотношения, характеризующие зависимости между диаметрами и длинами артерий являются органоспецифичными. На основе этих соотношений разработано программное обеспечение, позволяющее строить модели внутренних органов по параметрам питающей артерии. Показано, что сопротивление сосудистых бифуркаций для стационарного кровотока близко к минимальному (оптимальному по Мюррею) для трупных данных и характеризуется значительным разбросом при среднем нулевом значении – для живых испытуемых. Расчеты показали, что бифуркации, оптимальные для стационарного кровотока, характеризуются также близким к нулю коэффициентом отражения волн давления. Предложен механизм, объясняющий синхронную оптимизацию стационарной и волновой проводимостей бифуркаций сосудов.

На основе данных измерений построена обобщенная модель системного русла, которая включает сегменты, обнаруженные у всех исследованных трупов. Различающиеся сегменты составляют возможные индивидуальные вариации строения русел. На основе модели Womersley осесимметричного волнового кровотока в каждой артерии и условий непрерывности расхода и давления в бифуркациях разработано программное обеспечение, позволяющее проводить расчеты скоростей и объемных расходов в сосудах, давлений в узлах, параметров волн давления и скорости, колебаний диаметра сосудов, проходящих и отраженных волн. На основе проведенных расчетов были предложены методы анализа зависимостей давление-расход и интенсивностей падающей и отраженной волн (wave-intensity analysis). Эти методы позволяют выявлять механические процессы, которые приводят к тем или иным картинам пульсовых волн в сосудах при разных патологиях.