

ОТРАЖЕНИЕ ПУЛЬСОВЫХ ВОЛН И РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА АРТЕРИАЛЬНЫХ РУСЕЛ С АНАСТОМОЗАМИ

Н.Н.Кизилова

Харьковский национальный университет им.В.Н.Каразина
61077, Украина, Харьков, пл.Свободы, 4.

Работа посвящена исследованию закономерностей распространения волн давления в заполненных жидкостью системах податливых трубок. Задача связана с распространением пульсовых волн в артериальных руслах и возможностями пульсовой диагностики на основе исследования амплитудно-частотного спектра пульса. В работе проведен сравнительный анализ проводимостей для двух схем организации русла. Для дихотомически ветвящихся систем итеративная процедура позволяет вычислить проводимость как функцию параметров системы. Для русел с анастомозами задача сводится к решению нелинейной алгебраической системы. Исследованы аналитические решения для случая симметричных систем. Показано, что существует набор резонансных частот, амплитуды которых сильно меняются при вариации условий отражения на концах, а соответствующие фазы достигают экстремума, что позволяет использовать указанные показатели для диагностики. Набор резонансных частот определяется длиной трубки первого порядка ветвления и наличием или отсутствием анастомозов.

PULSE WAVE REFLECTION AND RESONANT PROPERTIES OF ARTERIAL NETWORKS WITH ANASTOMOSIS

The article is devoted to investigation of pressure waves propagation in the systems of elastic tubes filled with a fluid. The problem is connected with pulse wave propagation in the arterial beds and pulse diagnosis based on the investigation of the amplitude-frequency spectra of the pulse. The comparative analysis of the admittance of two networks is carried out. For the dichotomous branching beds the iterative procedure allows to calculate the admittance as a function of the parameters of the system. For the networks with anastomosis the problem is reduced to the decision of nonlinear algebraic system. The analytical solutions for the case of symmetric systems are investigated. It is shown that there is a set of resonant frequencies. The corresponding amplitudes significantly vary at the wave reflection conditions variation and their phases achieve the extremum. The parameters of resonant harmonics can be used in medical diagnostics. The set of harmonics is defined by the first order tube length and presence or absence of the anastomosis.

1. Введение

Распространение волн давления в артериальных руслах исследуется в гидромеханике на основе моделей движения жидкости в деформируемых трубках. В качестве простейшей модели сосудистого русла, имеющего в действительности сложную пространственную организацию, используются модификации модели упругой камеры [1], которые позволяют исследовать многие особенности волновых течений жидкости, однако не могут адекватно описать процессы распространения и отражения волн давления и обусловленных ими осцилляций объемного расхода. Артериальные русла представляют собой нерегулярные ветвящиеся системы, состоящие из цилиндрических проводящих элементов, механические и геометрические параметры которых отличаются у разных внутренних органов и зависят от номера порядка ветвления элемента. Многократные ветвления обеспечивают равномерную доставку крови в каждую точку органа, а вариации геометрии русла связаны с особенностями структуры и функции органа. Морфометрические данные выявили ряд закономерностей в организации русел отдельных органов, а статистический анализ результатов измерений показал, что геометрия дихотомически ветвящихся русел соответствует модели оптимального трубопровода, обеспечивающего доставку жидкости к распределенной системе потребителей с минимальными суммарными затратами [2].

Волновой характер перемещения крови по сосудам определяет особенности функции внутренних органов. Так, при искусственной перфузии последних стационарным потоком изменяется нормальный характер распределения крови в русле и нарушается функция органа. Помимо этого, существует согласование времен распространения пульсовых волн по руслам отдельных органов [1]. Особенности геометрии системы коронарных артерий обеспечивают усиление притока крови в малые артерии порядка $j=15$ и выше [3]. Целый ряд экспериментальных данных подтверждает, что ветвящиеся артериальные русла не являются

только пассивными резистивными элементами в системе кровообращения.

Податливость стенок сосудов позволяет исследовать пульсовые изменения объема периферических артерий и использовать соответствующие характеристики в целях диагностики. Традиционная методика пульсовой диагностики восточной медицины предусматривает анализ перемещения стенок ряда поверхностных артерий при специальном поджатии сосуда, что позволяет в итоге определить патологии регуляторных систем организма и внутренних органов. В последнее время предложена и активно исследуется новая методика диагностики, связанная с анализом спектра пульсовых колебаний произвольной периферической артерии [4-6]. Методика основана на представлении о существовании у отдельных органов резонансных частот, на которых входная проводимость русла Y , определяемая как отношение объемного расхода Q к давлению P во входном сечении основной (питающей) артерии русла $Y = Q/P$, имеет локальные экстремумы. При этом амплитуды резонансных гармоник сильно меняются при любых патологиях органа, и их анализ дает важную диагностическую информацию. Обе методики пульсовой диагностики пока в недостаточной мере изучены методами современной гидромеханики. Наличие резонансных гармоник связано с характером отражения волн в русле соответствующего органа и с особенностями строения русла. Для дихотомически ветвящихся сосудистых систем определение входной проводимости основано на последовательной замене двух конечных проводящих элементов одним, задающим те же условия отражения волны. В итоге можно заменить всю систему одной трубкой, эффективная проводимость которой отражает свойства русла в целом [7]. Однако реальные сосудистые русла имеют соединения между сосудами одного порядка ветвления – анастомозы, что не позволяет применять к ним указанную методику. В данной работе предложен метод определения входной проводимости анастомозирующих русел и проведено исследование проводимости и резонансных свойств на простейшей модели анастомоза в дихотомически ветвящемся русле, содержащем $j = 3$ порядка трубок.