

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОВЕРОЧНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Алексей Игоревич Сойко^{1*}, Робиндар Николаевич Каратаев¹, Иван Владимирович Ключкин², Валерий Алексеевич Гогин³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,

²Казанский государственный медицинский университет,

³Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Татарстан

Реферат

Рассмотрена гидравлическая модель сосудистой системы человека, представленная с позиции классификации и систематизации основных сосудов, выделены основные потребители кровеносной системы, подробно рассмотрена область регуляции, связанная с процессами измерения артериального давления и частоты сердечных сокращений.

Ключевые слова: сосудистая система человека, гидравлическая модель, приток, стоки, поверочные установки средств измерений, артериальное давление, частота сердечных сокращений.

THE USAGE OF A HYDRAULIC MODEL OF THE VASCULAR SYSTEM IN THE DEVELOPMENT OF VERIFICATION UNITS FOR BLOOD PRESSURE MEASURING DEVICES A.I. Soyko¹, R.N. Karataev¹, I.V. Klyushkin², V.A. Gogin³. ¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia, ²Kazan State Medical University, Kazan, Russia, ³State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia. The hydraulic model of the human circulatory system was discussed, presented from the position of classification and systematization of the major blood vessels, identified were the main consumers of the circulatory system, considered in detail was the area of regulation associated with the processes of blood pressure and heart rate measurement. **Keywords:** human vascular system, hydraulic model, in-flow, outflow, verification units of measuring devices, arterial blood pressure, heart rate.

Моделирование сердечно-сосудистой системы – важное и актуальное научное направление, нашедшее широкое применение в различных областях, например при исследовании регуляции артериального давления, кровоснабжения органов, разработке методов и средств для оценки параметров гемодинамики и т.д. Для описания многих биологических процессов используют различного рода аналогии, например механические (Хилл, 1938, 1972), электрические (Noordergraaf A, 1969), электронные (Заботин В.И., 1964) и др. Аналогии, используемые в данной работе и связывающие основные понятия гемодинамики, направлены на построение качественных моделей при проектировании эталонных устройств, используемых для поверки средств измерений артериального давления и частоты сердечных сокращений.

Цель работы – систематизация и классификация элементов сосудистой системы человека на основе применения методов гидравлики для качественного изучения процессов измерения артериального давления и частоты сердечных сокращений.

В основу данной модели положены гидравлические аналогии, позволяющие использовать их при описании как всей кровеносной системы, так и отдельных её участков [1].

Если рассматривать сердечно-сосудистую систему человека как некую гидравлическую модель, можно выделить три основные её подсистемы.

1. Источники давления или расхода (например, сердце, аккумулярующие ёмкости, мускулатура), обеспечивающие притоки транспортируемой крови в кровеносную систему. В качестве ёмкостей в сосудистой системе могут выступать вены, артериовенозные анастомозы, синусоиды селезёнки, а также другие паренхиматозные органы и мышцы, способные накапливать на короткое или длительное время большой объём крови и изменять тем самым интенсивность притока крови к органам и тканям.

2. «Трубопроводную, или гидравлическую, сеть», соединяющую источники с множеством потребителей, то есть доставляющую кровь к органам и системам организма.

3. «Потребители», то есть органы, где проходит или задерживается кровь.

Такое деление весьма условно и зависит от целей изучения кровеносной системы и характера решаемых задач. В табл. 1 приведены аналогии основных понятий гемодинамики, применяемых в гидравлике, используемые в данной статье.

Будем рассматривать кровеносную систему как гидравлическую сеть, представляющую собой анатомо-физиологическую подсистему организма, обеспечивающую по магистралям транспорт кислорода, углекислого газа, питательных веществ и прочего к потребителям [1]. Непрерывную работу этой сети при нормальном её функционировании осуществляют три источника.

1. Источник расхода, представляющий собой два последовательно включённых насоса для

Таблица 1

Основные понятия, применяемые для описания гидравлической модели сердечно-сосудистой системы человека

Основные понятия гемодинамики	Основные понятия гидравлики
Кровеносная система	Гидравлическая сеть
Сердце	Источник расхода
Отдельные органы или отделы кровеносной системы	Потребители (стоки)
Артериальные сосуды	Трубопроводы (магистралы), обеспечивающие приток крови
Венозные сосуды	Трубопроводы (магистралы), обеспечивающие отток крови
Кровяные депо	Бассейн (хранилище)
Сосуды и ткани организма человека, осуществляющие функцию временного депонирования крови	Накопительные, или аккумулирующие, ёмкости
Мускулатура сосудов (как венозных, так и артериальных), клапаны вен	Дополнительные двигатели
Объёмная скорость кровотока на выходе сосудистого участка	Модуль стока – количество жидкости, стекающей с определённой площади бассейна в единицу времени
Сосуды сопротивления (артериолы, функциональные прекапиллярные структуры магистральных капилляров)	Краны или клапаны гидравлической системы
Артериовенозные анастомозы	Магистралы с регуляторами давления или расхода

обеспечения притока крови по крупным магистралям к потребителям. Он генерирует пульсовые колебания с верхним (систолическим давлением – P_c) и нижним (диастолическим давлением – P_d) пределами измерения. По мере удалённости от источника расхода перепад между P_c и P_d сглаживается за счёт эластичных магистралей и стремится к усреднённому значению у потребителя.

2. «Ёмкости», то есть «потребители», содержащие в себе резервную часть крови и выбрасывающие её из бассейна при увеличении объёма циркулирующей крови.

3. Дополнительные двигатели крови, дающие добавочные силы для передвижения крови в магистралах, обеспечивающих отток крови.

Гидравлическая сеть представляет собой сложный кольцевой трубопровод, состоящий из нескольких параллельно функционирующих ветвей. Точки, в которых происходит разделение и объединение магистралей, будем называть узлами. Совокупность магистралей, исходящих из одного узла или входящих в один узел, называют контуром. Если магистралы имеют общие узлы выхода и входа, то контур называют замкнутым. Если магистралы имеют только один общий узел, то контур называют разомкнутым. В кровеносной системе контуры капиллярных сосудов замкнутые, для более крупных сосудов контуры разомкнутые [2].

Выделяют скорость кровотока на входе в i -й участок и на выходе из него. Каждая область со-

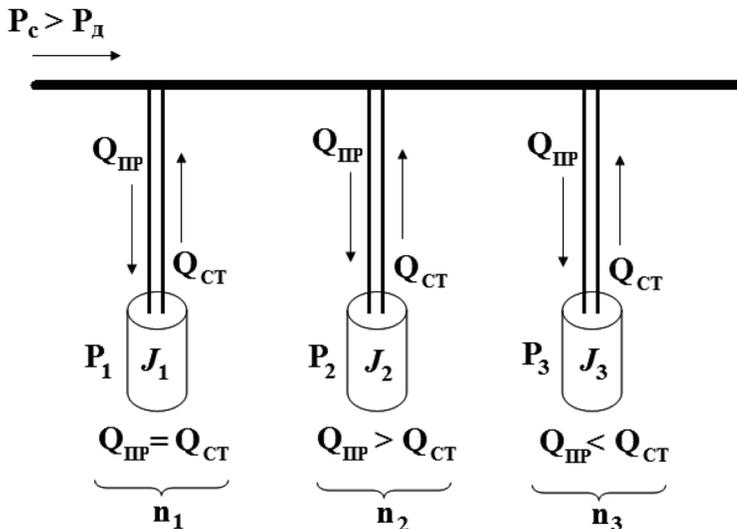


Рис. 1. Схема распределения крови по потребителям. Объяснение в тексте.

судистой системы (участок, сосуд, полость) содержит некоторый объём крови $V_1(t)$. На рис. 1 приведена структурная модель сосудистой системы, состоящая из трёх групп потребителей.

Первую группу образуют «потребители» J_1 в количестве n_1 , в которых объём приходящего расхода крови $Q_{\text{пр}}$ равен объёму оттока крови $Q_{\text{ст}}$ из данных органов, то есть давление P_1 при различных геометрических размерах артерий и вен одинаково.

Вторую группу составляют «потребители» J_2 в количестве n_2 , где объём расхода крови по сосудам, обеспечивающим приток крови $Q_{\text{пр}}$, больше оттока $Q_{\text{ст}}$. Известно, что не вся кровь постоянно циркулирует по кровеносным сосудам. В печени (20%), селезёнке (16%), подкожном жировом слое (10%) как в своеобразных хранилищах может накапливаться до 46% всей крови. Мышцы во время работы черпают кровь из депо и вовлекают её в интенсивное перемещение по кровеносным сосудам большого и малого кругов кровообращения. При отсутствии должной работы мышц существенная часть крови постепенно возвращается в данные резервуары. Это третья группа «потребителей» J_3 в количестве n_3 .

Перераспределение крови в гидравлической сети во многом определяется положением человека, например при вертикальном положении венозный возврат к источнику от сосудов, расположенных ниже уровня нулевого гидростатического давления, затруднён из-за влияния этого давления. При горизонтальном положении это давление не учитывают.

Рассмотрим частный случай применения такой классификации. С точки зрения задач измерения артериального давления и частоты сердечных сокращений интерес представляют контуры, включающие сосуды, на которых проводят измерения, то есть сосуды верхней, средней и нижней трети плеча в зависимости от типа рассматриваемых средств измерений [3]. Поскольку в практике диагностических исследований артериального давления используют принцип уравнивания давления известным внешним давлением (компрессионный метод), необходимо представить ряд особенностей, характеризующих частные случаи регуляции крови:

1) ограничение оттока венозной крови при уровне давления $P_m > P_d$ (P_m — давление манжеты тонометра), которое не оказывает влияния на условие притока артериальной крови в конечность (этот случай можно рассмотреть как J_2);

2) существенное ограничение притока артериальной крови при уровне окклюзии $P_d < P_m < P_c$ (J_3);

3) полное прекращение кровоснабжения и кровообращения конечности $P_m > P_c$;

4) восстановление артериального притока и венозного оттока после остановки кровообраще-

ния в конечности.

Следует отметить, что при проведении измерений прибор располагается на уровне сердца, влияние гидростатического давления на результат измерения не учитывают. Исходя из этого, можно представить модель кровообращения в верхней конечности как два взаимосвязанных гидравлических контура, в которых магистрали трубопроводов обеспечивают приток и отток крови, а резистивные и распределительные функции осуществляют «краны» и «регуляторы», определяющие артериальное давление и частоту сердечных сокращений в этой анатомической области.

Используя ряд описанных общих и частных случаев моделирования кровеносной системы, можно выделить требования к поверочным установкам для средств измерения артериального давления и частоты сердечных сокращений [4].

1. Поверочные установки представляют собой сложную гидравлическую сеть с двумя взаимосвязанными контурами, моделирующими большой и малый круги кровообращения, с общим источником расхода жидкости.

2. Магистрали трубопроводов имеют разные диаметры и эластичность, то есть имеют свою ёмкость.

3. Сосуды верхней конечности образуют схему из двух гидравлических контуров, регулирующих уровень окклюзии сосудов верхней, средней и нижней трети плеча. При этом давление притока и стока крови при отсутствии внешнего компрессионного воздействия будет одинаковым (J_1).

4. Деponирующая роль потребителей достигается введением резервуара (хранилища), обеспечивающего поддержание давления на требуемом уровне и циркуляцию всей жидкости при высоких частотах работы источника расхода.

5. Моделирование капиллярных процессов достигается введением специальных регуляторов, направленных на поддержание заданных параметров давления и расхода жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лищук В.А. Математическая теория кровообращения. — М.: Медицина, 1991. — 256 с.
2. Гозин В.А., Варгин А.А., Каратаев Р.Н. Метрологические аспекты измерений артериального давления и частоты сердечных сокращений. — Казань: Изд-во Каз. гос. тех. ун-та, 2003. — 99 с.
3. Сойко А.И., Гозин В.А., Ключкин И.В., Каратаев Р.Н. Поверка современных аппаратов измерения артериального давления и частоты пульса // Казан. мед. ж. — 2006. — №4. — С. 316–317.
4. Сойко А.И., Каратаев Р.Н. Поверочные установки измерителей артериального давления с использованием генераций пульсирующих потоков. — Казань: Отечество, 2009 — 132 с.