

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ МИОКАРДА

Милоков В. Е.^{1,2}, Жарикова Т. С.¹

На сегодняшний день болезни сердца и сосудов являются одной из основных причин инвалидизации и смертности населения. Современные представления об ангиоархитектонике миокарда не раскрывают в полной мере связь анатомии коронарных сосудов с их функцией с позиций обеспечения достаточности веночного кровоснабжения на тканевом уровне. Фильтрационные течения жидкости в неоднородных пористых средах широко распространены в природе и технике и привлекают повышенный интерес исследователей. При этом во множестве работ описывается фильтрация в многослойных и неоднородных грунтах. Миокард и питающие его сосуды можно представить в виде модели пористой среды, к которой применимы гидродинамические законы, используемые для оценки перфузии жидкости через пористые среды, что еще не использовалось для кровоснабжения органов и тканей организма человека. Предлагается направление совместной исследовательской работы врачей и физиков-гидродинамиков для получения результатов, позволяющих оценить организацию сосудистой сети и гидродинамические условия кровоснабжения сердца, что позволит обосновать единые критерии определения границ нормы и градиацию уровней нарушения перфузии миокарда, объективизировать патогенетические подходы лечения пациентов кардиологического профиля.

Российский кардиологический журнал 2016, 8 (136): 92–95
<http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2016-8-92-95>

Ключевые слова: миокард, коронарные сосуды, капилляры, гидродинамика, фильтрация, неоднородная пористая среда.

¹ГБОУ ВПО Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, Москва; ²Институт усовершенствования врачей МУНКЦ им. П. В. Мандрыка МО РФ, Москва, Россия.

Милоков В. Е. — д.м.н., профессор кафедры анатомии человека лечебного факультета, профессор кафедры военно-полевой хирургии, Жарикова Т. С. — ассистент кафедры анатомии человека лечебного факультета.

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author): wise_tanya@mail.ru

Рукопись получена 13.05.2015
 Рецензия получена 03.06.2015
 Принята к публикации 10.06.2015

HYDRODYNAMIC FUNDAMENTALS FOR PHYSICAL-MATHEMATICAL MODEL OF MYOCARDIUM CIRCULATION

Milyukov V. E.^{1,2}, Zharikova T. S.¹

Currently the diseases of heart and vessels are the primary cause of disability and mortality. Recent understanding of myocardial angioarchitectonics does not reveal fully the relation of coronary anatomy with their function related to their aim for sufficient blood supply in coronary system at tissue level. Filtration liquid currents in non-homogenic porous mediums are widely spread in nature and technology and highly attractable for researches. Also, there is broadly discussed filtration in multilayered non-homogenic grounds. Myocard and its vessels can be represented as the model of porous medium, towards which the hydrodynamic laws can be applied, that are in use for liquid perfusion assessment in porous mediums perfusion. This has never been applied to circulation of a human organs and tissues. The direction is presented for collaboration of physicians and physics-hydrodynamicians to obtain results for better assessment of vascular organization net and hydrodynamical circumstances of the heart circulation, which might further

lead to universalized criteria for reference ranges definition and myocardium perfusion levels of disorder; to objectify pathogenetic approaches to cardiovascular patients treatment.

Russ J Cardiol 2016, 8 (136): 92–95
<http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2016-8-92-95>

Key words: myocardium, coronary vessels, capillaries, hydrodynamics, filtration, non-homogenic porous medium.

¹I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health, Moscow; ²P. V. Mandryka Institute of Physicians Improvement of MESCC, Moscow, Russia.

Кардиоваскулярные заболевания являются одной из главных причин инвалидизации и смертности трудоспособного населения по всему миру и вносят ощутимый вклад в повышение затрат государств на здравоохранение [1]. Так, ишемическая болезнь сердца распространена во многих странах мира, особенно — в индустриально развитых (страны Европы, США, Австралия, Япония) [2–4]. В настоящее время для определения стратегии лечения кардиоваскулярных заболеваний и контроля его эффективности существуют различные подходы [5]. Для грамотного и своевременного применения избранного метода лечения пациентов с кардиоваскулярными заболеваниями необходимо четкое представление об анатомии коронарных сосудов и уровне перфузии миокарда у каж-

дого конкретного больного. При этом очевидно, что для объективной оценки гемодинамики по сосудистой системе сердца и описания законов перфузии необходимо использовать гидродинамические основы физико-математической модели кровоснабжения миокарда.

Сердце кровоснабжают две коронарные артерии — правая и левая, — которые берут свое начало от соответствующих синусов аорты. Левая коронарная артерия отходит от левого аортального синуса, проходит между легочной артерией и левым ушком предсердия, располагаясь под эпикардом, и делится на две ветви: переднюю межжелудочковую и более крупную — огибающую, которая переходит на заднюю поверхность сердца и располагается в венечной

борозде. Нередко встречается и третья (диагональная) ветвь, отходящая от огибающей ветви или от угла между обеими главными ветвями. Ветви левой коронарной артерии снабжают кровью левую половину сердца, всю переднюю и часть задней стенки правого желудочка, а также передний отдел межжелудочковой перегородки. Правая коронарная артерия, берущая начало от правого синуса аорты, располагаясь также под эпикардом, между ушком правого предсердия и артериальным конусом, огибает правый (острый) край сердца и по венечной борозде направляется на его заднюю поверхность, образуя заднюю межжелудочковую ветвь. Ветви правой коронарной артерии снабжают кровью правую половину сердца, а также межпредсердную перегородку и заднюю часть межжелудочковой [6, 7].

Сети ветвей венечных артерий по-разному располагается относительно слоев стенок сердца. Имеются данные, что коронарные артерии ориентированы перпендикулярно плоскости расположения мышечных пучков в среднем слое миокарда, а в наружном и глубоком — по ходу мышечных пучков [8]. Таким образом, в стенках сердца можно выделить несколько различно пространственно ориентированных сосудистых сетей, однако отсутствуют данные, какого порядка ветвления и диаметра эти сосуды.

Следовательно, пространственное расположение венечных артериальных сосудов и их ветвей можно представить в виде системы артериальных сетей, имеющей три уровня. Первый уровень, или отдел, — магистральные ветви коронарных артерий, которые располагаются на поверхности сердца под эпикардом, что обеспечивает минимизацию компрессии этих сосудов при сокращении сердечной мышцы в результате функциональной деятельности сердца. От них отходят сосуды второго уровня — сосуды, следующие перпендикулярно поверхности слоев миокарда и прободающие все его слои. От них отходят, в свою очередь, сосуды к мышечным волокнам, и сети, образуемые этими сосудами, располагаются параллельно друг другу между тремя слоями миокарда. Этот третий уровень — обменный — включает в себя сосуды гемомикроциркуляторного русла, которые являются комплексом кровеносных микрососудов, регулирующих кровенаполнение и перфузию тканей сердца [7-9]. Сосудистыми элементами гемомикроциркуляторного русла являются артериолы, прекапилляры, капилляры (обменные сосуды), посткапилляры, венулы и артериоло-венулярные анастомозы. Диаметр артериол составляет 50-100 мкм, капилляров — около 7 мкм, причем диаметр венозной части капилляров может быть в 1,5-2 раза шире, чем у его артериальной части, а посткапиллярные венулы, имеющие диаметр 8-30 мкм, переходят в собирательные венулы (диаметр 30-50 мкм), а затем — в мышечные венулы (диаметр 50-100 мкм) [9].

Фильтрационные течения жидкости в неоднородных пористых средах широко распространены в природе и технике и постоянно привлекают повышенный интерес исследователей. Множество работ посвящено изучению фильтрации в многослойных и неоднородных грунтах [10]. Теоретически исследована фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородной пористой среде. С учетом различных инерционных эффектов обоснованы уравнения фильтрации. С этой целью пористая среда рассматривалась как совокупность капилляров. Для установления связи расхода жидкости с градиентом давления учитываются потери давления вследствие извилистости капилляра, непостоянства размеров поровых каналов, пересечения капилляров и вследствие систематического расширения капилляров [11].

Изучены и описаны закономерности, которые применяются для оценки возможности перфузии жидкости через пористые среды, однако эти законы до настоящего времени не рассматривались применительно к тканям живого организма. По нашему мнению, сердечная мышца также может быть представлена как модель пористой среды, движение жидкости — крови — в которой подчиняется законам физики и может иметь математическую объективную оценку. В этой модели пористой среды стенок сердца, которая, так же, как и в геологии, характеризуется неоднородной системой первичных пор, имеется система трещин, каналов и каверн, которые могут быть описаны как функционирующие и нефункционирующие артериоло-венулярные анастомозы, функционирующие и нефункционирующие капилляры миокарда. Поровые пространства мы предлагаем сравнивать с капиллярами.

Моделирование пористых сред и их классификация в геологии и гидродинамике производится по двум основным направлениям: геометрическому и механическому. Среди геометрических моделей пористых сред выделяют гранулярные (поровые) и трещиноватые среды. В трещиноватых средах микротрещины сообщают эти пустоты между собой и способствуют фильтрации (прохождению) жидкостей. Ведущую роль в фильтрации жидкости в таких средах играет система микротрещин, сообщающей эти пустоты между собой [12]. Мы также предлагаем сравнивать их с капиллярами. Трещиноватые пористые среды представляют собой систему, где пористые блоки играют роль “зерен”, а трещины — роль извилистых “пор”, что также позволяет сравнивать такие среды с миокардом, где мышечные волокна (клетки) можно принять за пористые блоки, а капилляры и артериоло-венулярные анастомозы — за трещины (поры). Емкость и фильтрация в пористой среде зависят от структуры порового пространства между зернами породы, а среды являются индивидуальными, что также позволяет проследить аналогию с сердеч-

ной мышцей, имеющей различную толщину и индивидуальные особенности расположения питающих ее сосудов у каждого человека. Кроме того, в пористых средах имеются тупиковые поры, которые в нашем случае можно сравнить с нефункционирующими капиллярами.

К механическим моделям пористых сред относят упругие (кулоновские) среды, которые линейно изменяют объем пор под действием нагрузки и полностью восстанавливают его после разгрузки. Поскольку артериальная система способна регулировать приток крови и изменять диаметр сосудов, несущих артериальную кровь, в зависимости от нагрузки, это еще один признак, свидетельствующий в пользу сходства структуры пористых сред и миокарда. Необходимо учесть растяжимость стенок сосудов, их эластичность и способность к восстановлению формы, т.е. диаметра.

В связи с тем, что к пористым средам относятся базальты, песчаники и известняки, движение жидкости в которых хорошо исследовано, мы предполагаем, что данные законы будут действовать и в случае применения их для описания гемодинамики в стенках сердца, что позволит использовать законы гидродинамики для оценки кровоснабжения сердечной мышцы. Изучение миокарда в качестве модели пористой среды, которая имеет множество пор, трещин, каналов и каверн, позволит оценить степень (уровень) организации сети коронарных сосудов у конкретного пациента и сделать вывод о том, насколько интенсивно и адекватно потребностям миокарда происходит его кровоснабжение у больных кардиоваскулярными заболеваниями.

По аналогии с пористостью в трещиноватых средах используют термин “трещиноватость”. При описании пористости говорят о полной пористости, когда учитываются все поры, и активной пористости, когда учитывают только единую систему соединенных между собой пор и могут быть заполнены жидкостью. В нашем случае миокард — это среда с активной пористостью, где поры заполняются кровью. Кроме того, существует такой показатель, как “просветность”, обозначающий отношение площади активных пор (т.е. сообщающихся с другими пространствами) в любом сечении, проходящем через данную точку, ко всей площади сечения [12]. Соответственно, просветность равна пористости. Помимо этого, для описания трещиноватых сред используются такие параметры, как средняя длина трещин, а также раскрытость трещин, в нашем случае — доля функционирующих капилляров. Отношение длины всех трещин, находящихся в данном сечении трещинной породы к удвоенной площади сечения называется густотой трещин [12]. Для сравнения с терминами, применяемыми в геологии, мы предлагаем в миокарде в качестве аналога этого параметра при-

менять плотность капиллярной сети на единицу площади или единицу объема образца миокарда.

Функциональную оценку интрамуральной сосудистой системы миокарда возможно провести с применением такого гидродинамического термина, как проницаемость — т.е. способность образца породы пропускать через себя жидкость при перепаде давления, а в нашем случае — образца ткани (миокарда) пропускать кровь. Данная модель кровоснабжения миокарда предлагается впервые. Поскольку проницаемость рассчитывается, исходя из разности давлений, длины сосудов, вязкости крови и скорости фильтрации, что у всех людей является относительно постоянной величиной, можно предположить, что, возможно, в норме коэффициент проницаемости будет постоянным у здоровых людей. Однако требуются дальнейшие исследования как для определения значения этой величины, так и возрастной динамики, и ее изменений в зависимости от половой принадлежности. Проницаемость пород в геологии описывается тензорной величиной, для определения которой разработаны различные аналитические и численные методы [13]. Таким образом, в случае описания миокарда для расчета значения проницаемости возможно применение различных численных методов и компьютерных программ.

В свою очередь, фильтрация позволяет оценить действующее в данный момент капиллярное русло. В простейшем случае для описания скорости фильтрации используется закон Дарси — отношение произведения градиента давления и проницаемости к вязкости крови или же отношение расхода крови к площади его поперечного сечения [14]. При малых скоростях фильтрации проявляются неньютоновские реологические свойства жидкости. Известно, что кровь — неньютоновская жидкость из-за наличия эритроцитов, способных образовывать агрегаты. Обменным звеном системы гемомикроциркуляторного русла в тканях и органах человека являются капилляры. Недостаточно хорошо изучен вопрос о количестве сосудов на единицу площади или объема сердечной мышцы. Известно лишь, что количество капилляров составляет примерно 2500–3000 на 1 мм³ [9]. Термин “пористость” применим к сосудам гемомикроциркуляторного русла, однако пористость не всегда соответствует показателю функционально действующих капилляров, поскольку количество функционирующих капилляров в миокарде изменяется под действием нагрузки. Следовательно, количество функционирующих капилляров — это переменная величина. Зависимость этой величины от других параметров, характеризующих данную среду (модель), может быть описана на основе законов гидродинамики.

Таким образом, строение гемомикроциркуляторного русла сердца, а, возможно, и всей коронарной

системы, дает возможность представить миокард в качестве пористой среды с щелевыми пространствами и, следовательно, применить по отношению к этой модели законы гидродинамики, используемые для оценки перфузии жидкости через пористые среды, описать гемодинамику миокарда на основе создания физико-математической модели. Очевидна необходимость совместной исследовательской

работы врачей и физиков-гидродинамиков для получения результатов, позволяющих оценить организацию сосудистой сети (системы) сердца, что позволит предложить единые критерии определения адекватности перфузии миокарда, выработать патогенетически обоснованные подходы к определению лечебной тактики и повысить эффективность лечения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Литература

1. Prevention of cardiovascular disease: guidelines for assessment and management of total cardiovascular risk. World Health Organization, 2007; 86 p.
2. Mazurov VI, Shostak MS. Peculiarities of coronary heart disease in men with metabolic syndrome. Medical academic journal 2012; 12 (4): 7-14. Russian (Мазуров В.И., Шостак М.С. Особенности течения ишемической болезни сердца у мужчин с метаболическим синдромом. Медицинский академический журнал 2012; 12 (4): 7-14).
3. Chazov EI. Thiazide diuretics in treatment of the hypertensive patients. Sechenov gazette 2010; 2: 8-13. Russian (Чазов Е.И. Тиазидные диуретики в лечении больных артериальной гипертензией. Сеченовский вестник. 2010; 2: 8-13).
4. Perioperative rehabilitation of patients with complicated forms of ischemic heart disease. ed. V.V. Plechev. Ufa; 2012. Russian (Периоперационная реабилитация больных осложненными формами ишемической болезни сердца. Под ред. проф. В.В. Плечева. Уфа, 2012. 336 с.)
5. Cardiovascular disease prevention. Translating evidence into action. Geneva, World Health Organization, 2005.
6. Muresian H. The clinical anatomy of coronary arteries. Bucharest. Publishing: Editura Enciclopedica; 2009.
7. Fal'kovskiy G.E. The structure of the heart and anatomical bases of its function. Moscow: Publishing of Bakoulev center for cardiovascular surgery; 2014. Russian (Фальковский Г.Э. Строение сердца и анатомические основы его функции. М.: Издательство НЦССХ им. А.Н. Бакулева, 2014. 217 с.).
8. Sinelnikov RD, Sinelnikov YR, Sinelnikov AY. Atlas of human anatomy. In 4 volumes. Moscow. Publishing "Novaya volna", 2014. Russian (Синельников Р.Д., Синельников Я.Р., Синельников А.Я. Атлас анатомии человека. В 4 томах. Том 3. М.: Новая волна, 2014).
9. Manual of Histology. Ed. by R. Danilov. Saint Peterburg. Publishing "SpecLit", 2011. Russian (Руководство по гистологии. Под ред. Р.К. Данилова. В 2-х томах. СПб.: "СпецЛит", 2011. 831 с.).
10. Golubev GV, Tumashev GV. Incompressible fluid filtering in a heterogeneous porous medium. Kazan. Publishig "Kazan", 1972. Russian (Голубев Г.В., Тумашев Г.В. Фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородной пористой среде. Казань: Казан. ун-т, 1972. 195 с.).
11. Siraev RR. Fluid filtering in a heterogeneous porous medium. Fundamental researches. 2013; 11: 451-5. Russian (Сираев Р.Р. Фильтрация жидкости в неоднородной пористой среде. Фундаментальные исследования. 2013; 11: 451-5).
12. Basniev KS, Vlasov AM, Kochina IN, et al. Underground hydromechanics. Moscow. Publishing "Nedra", 1993. Russian (Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов. М.: Недра, 1993. 416 с.).
13. Masket M. Homogeneous fluid flow in a porous medium. Moscow-Izhevsk., 2004 Russian (Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 628 с.).
14. Bagov RA, Tsej R. On the fundamental ideas of the theory of filtration and the main stages of its development. Gazette of Adygeya State university. Episode 4: The natural-mathematics and technical sciences. 2007; 4: 72-4. Russian (Баров Р.А., Цей Р. Об основных понятиях теории фильтрации и основных этапах ее развития Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2007; 4: 72-4).