



УДК 531/534:[57+61]

БИОМЕХАНИКА ЛЕВШИ

В.Г. Грацинский

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма “ЭЛМАШ+”», Россия, 410041, Саратов, ул. 2-я Прокатная, 15–2, e-mail: e-mail:1234bg@mail.ru

Аннотация. Цель статьи состоит в выяснении биомеханических особенностей функционирования симметричных органов человека – правой и левой рук. Выясняется основная причина отклонений от симметрии – различное артериальное давление в артериях, обеспечивающих кровью руки. Рассматриваются биомеханические возможности появления особенностей развития типа левши, когда у человека левая рука оказывается сильнее и ловчее правой, в отличие от остальных людей. Такой вариант вполне возможен, если поток крови через левую подключичную артерию при меньшем артериальном давлении на её входе по сравнению с артериальным давлением на входе в правую руку, будет больше, чем в правой руке. Описываются экспериментальные результаты, подтверждающие выводы работы. Делаются медицинские рекомендации по выполнению одной из основных клинических процедур – измерению артериального давления.

Ключевые слова: биомеханика, артериальное давление, дуга аорты, левша.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в медицине существует определённое представление о соотношении функционирования правых и левых органов в человеке. Например, обычно считается, что не имеет различия при определении артериального давления, на какой руке закреплять измерительную манжету: на левой руке или на правой [1]. Некоторые же считают, что (см., например [2]) лучше проводить измерения на руке с более высокими значениями артериального давления.

В медицинской практике определено, что артериальное давление подвержено резким колебаниям даже в короткие промежутки времени. Уровень артериального давления зависит от многих факторов. В течение суток разница в показаниях у здоровых людей может составлять 30–50 мм рт. ст. систолического (верхнего) давления и 10 мм рт. ст. диастолического (нижнего) давления. Зависимость артериального давления от разных факторов индивидуальна у каждого человека. За час до проведения измерения давления должен быть исключён приём пищи, за 1,5–2 часа курение, приём тонизирующих напитков, алкоголя. Такие требования создали неопределённое отношение к этому важнейшему параметру состояния организма человека.

Опыт автора по выполнению многочисленных расчётов давления в программном комплексе ANSYS в артериях, наполненных кровью и подкреплённых стентом, позволяет сделать более определённое представление о возможном характере распределения давления в дуге аорты и отходящих от неё артериях.

ФАКТЫ ИСТОРИИ

Существует масса биомеханических фактов, сложившихся с давних пор: это объекты, состояния и другие понятия, которые ставят ряд вопросов.

Вопрос 1. Почему у мужских рубашек кармашек для мелочей делается на левой стороне?

Вопрос 2. Почему у мужских пиджаков кармашек для мелочей делается также на левой поле пиджака?

Вопрос 3. Почему в Великобритании левостороннее движение автомобилей, а руль расположен с правой стороны автомобиля?

Вопрос 4. Почему левая рука у людей слабее правой?

Вопрос 5. Почему население в основном пишет правой рукой?

Вопрос 6. Почему верующие крестят себя также пальцами правой руки?

И таких «почему» можно привести множество, хотя ответы на эти вопросы неопределённые и неоднозначны. Так есть и всё тут! Так сложилось в истории от дедов и прадедов.

Правильный ответ на первый вопрос: «Потому, что в кармашек для мелочей засылает их правая рука, а левой рукой в левый кармашек положить что-то очень неудобно, можно промахнуться и потерять это что-то, например, документ.

Правильный ответ на второй вопрос такой же, как на первый.

Правильный ответ на третий вопрос: «Потому, что в Великобритании в средние века были в почёте и славе рыцарские турниры, на которых рыцари в тяжёлых боевых доспехах и с копьём мчались на конях навстречу один другому, чтобы копьём сбить противника с лошади. Задача не из простых, поэтому использовались все ресурсы организма, а копьё всегда держалось в правой руке, как более сильной.

Когда же в Англии появились автомобили, то руль, также как и копьё, англичане по традиции доверили именно правой руке, как более сильной, а первые автомобили испытывались на этих площадках для турниров с уже наезженными в турнирах «полосами движения».

Вопрос основной состоит в том: «Почему правая рука сильнее левой и почему правая рука ловчее левой и почему именно правой рукой человек делает всевозможные самые тяжёлые и самые тонкие и ответственные работы?»

БИОМЕХАНИКА ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ РУК

На рис. 1 представлена общая схема органов кровообращения человека (см. например [3]). На ней видно, что при выходе из сердца кровь движется по аорте мимо нескольких крупных артерий.

Аорта, *aorta*, – самый крупный артериальный сосуд в теле человека. Она выходит из левого желудочка сердца, начало её – отверстие аорты, *ostium aortae*. От аорты отходят все артерии, образующие большой круг кровообращения. Аорта делится на восходящую аорту, *aorta ascendens*, дугу аорты, *arcos aortae* и нисходящую аорту, *aorta descendens*. Далее аорта продолжается до расхождения в артерии левой и правой ног (как на рис. 1).

Aorta descendens в свою очередь делится на грудную аорту, *aorta thoracicus* и брюшную аорту, *aorta abdominalis*.

Восходящая аорта *aorta ascendens* является продолжением *conus arteriosus* левого желудочка и начинается от *ostium aortae*. Позади левой половины грудины на уровне третьего межреберья она направляется вверх, немного вправо и вперёд и доходит до уровня хряща II ребра справа, где продолжается в дугу аорты.



Рис. 1. Общая схема органов кровообращения человека [3]

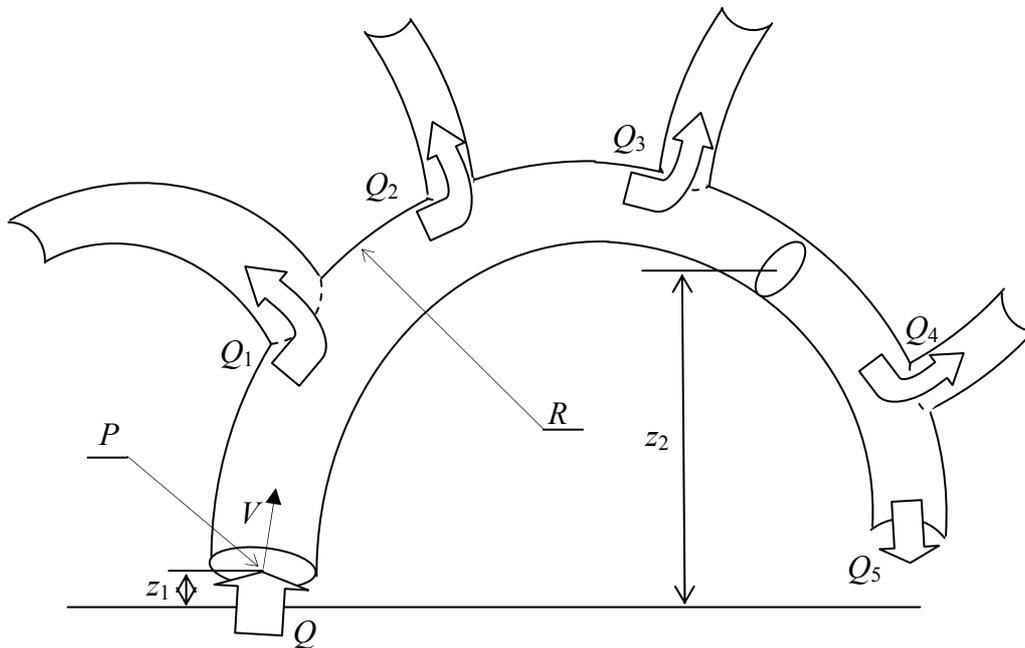


Рис. 2. Схема дуги аорты: Q – поток крови от сердца; Q_1 – поток в артерию правой руки; Q_2 – Q_3 – потоки к сосудам головы; Q_4 – поток к левой руке; Q_5 – поток крови в нисходящую ветвь аорты; R – радиус дуги аорты; z – высота расположения центра тяжести сечения над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью (плоскостью сравнения); z_1 – первое сечение – начальное; p – давление (абсолютное или избыточное), V – средняя скорость в центре тяжести сечения

Дуга аорты, *arcus aortae*, обращена выпуклостью вверх и направляется спереди назад, переходя в нисходящую аорту. Дуга аорты имеет направление от хряща II ребра справа к левой поверхности тела около III–IV грудных позвонков. От дуги аорты отходят либо три, либо четыре (как на рис. 2) крупных сосуда: 1) правая подключичная артерия, *a. subclavia dextra*, 2) правая общая сонная артерия, *a. carotis communis dextra*,

3) левая общая сонная артерия, *a.carotis communis sinistra* и 4) левая *подключичная артерия, a. subclavia sinistra*. Начальной частью аорты является восходящая аорта. Она представляет собой крупный сосуд диаметром до 4 см и длиной около 6 см, который идёт вверх и влево и на уровне правого грудно-ключичного сустава от него отходит правая подключичная артерия.

Ниже будут представлены результаты расчётов параметров крови в артериях правой и левой рук именно при таком их расположении в дуге аорты.

Очевидно, что чем выше давление в артерии, тем быстрее поток крови в ней, тем быстрее обменивается кровь в мышцах, тем свежее кровь, тем больше кислорода приносится к мышцам.

И, наоборот, чем меньше давление на входе в артерию, тем медленнее ток крови по кругу её органа, тем застойнее насыщение углекислого газа в мышце, тем она слабее.

Например, во время бега на стадионе или в быту пульс бегущего значительно учащается именно для того, чтобы как можно больше принести кислорода к мышцам, участвующим в беге, и быстрее унести из них углекислый газ. При нехватке кислорода бегун просто задыхается.

Кровь человека представляет собой жидкость, и её движение может исследоваться методами движения жидкости.

В биомеханике известны принципы гемодинамики, изучающей механизмы движения крови в сердечнососудистой системе. **Успешно** применяются законы последовательного и параллельного соединения сопротивлений сосудов. Известно артериальное «дерево человека» составленное Ноордерграафом, для основных кровеносных сосудов (см. напр. [4]).

Дуга аорты с отходящими от неё артериями и система артерий, отходящих от аорты, может быть представлена по методу электрогидравлических аналогий схемой активных сопротивлений по рис. 3. Для расчёта общего периферического сопротивления сосудов по большому кругу кровообращения получена специальная формула (3), приведённая ниже.



Рис. 3. Гемодинамическая схема кровообращения по большому кругу (по методу электрогидравлических аналогий)

На схеме (рис. 3) имеются следующие обозначения:

точка 1 – выход из сердца (*ostium aortae*), начало восходящей аорты (*aorta ascendens*);

точка 2 – начало правой подключичной артерии (*a. subclavia dextra*);

точка 3 – начало правой общей сонной артерии (*a. carotis communis dextra*);

точка 4 – начало левой общей сонной артерии (*a. carotis communis sinistra*);

точка 5 – начало левой подключичной артерии (*a. subclavia sinistra*) и начало нисходящей аорты (*aorta descendens*);

точка 6 – начало остальной части аорты и связанных с ней артерий.

точки 7, 8, 11 – точки выхода соответствующих вен в нижнюю полую вену;

точки 9, 10 – точки выхода соответствующих вен в верхнюю полую вену;

точка 12 – место слияния верхней и нижней полых вен.

В гемодинамике считается, что в точках 7–12 давление $P = 0$.

Q – поток из луковички аорты (*ostium aortae*);

Q_1 – поток в правую подключичную артерию;

Q_2 – поток в правую общую сонную артерию;

Q_3 – поток в левую общую сонную артерию;

Q_4 – поток в левую подключичную артерию;

Q_5 – поток в остальной части аорты и связанных с ними артериях.

ΔP_1 – падение давления на участке между точками 1 и 2;

ΔP_2 – падение давления на участке между точками 2 и 3;

ΔP_3 – падение давления на участке между точками 3 и 4;

ΔP_4 – падение давления на участке между точками 4 и 5;

ΔP_5 – падение давления на участке между точками 5 и 6;

При этом общий поток

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (1)$$

Параметрами на входе схемы (рис. 3) являются поток Q , среднее давление P и общее периферическое сопротивление сосудов R , которые связаны известными соотношениями

$$Q = \frac{P}{R} \quad \text{и} \quad P = QR. \quad (2)$$

Здесь задаются известными величины Q и P и не известна величина R .

Если известны отдельные сопротивления каждой из артерий (рис. 3), то общее сопротивление R между точками 1 и 12 можно подсчитать по формуле (3)

$$R = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9 + R_{10}}}}}}}}}}, \quad (3)$$

где R_1 – сопротивление восходящей аорты (от луковички аорты до точки 2), длина восходящей аорты обычно около 60 мм, диаметр около луковички аорты порядка 25–30 мм;

R_3 – сопротивление в дуге аорты между точками 2 и 3;

R_5 – сопротивление в дуге аорты между точками 3 и 4;

R_7 – сопротивление в дуге аорты между точками 4 и 5;

R_9 – сопротивление нисходящей аорты;

R_2 – сопротивление в правой подключичной артерии;

R_4 – сопротивление в правой общей сонной артерии;

R_6 – сопротивление в левой общей сонной артерии;

R_8 – сопротивление в левой подключичной артерии;

R_{10} – сопротивление в остальной части аорты и связанных с ними артериях.

Формулы вида (3) известны в математике и обычно вычисляются рекуррентно (см. [4, 5]).

Каждое из сопротивлений в формуле (3) можно подсчитать по формуле Пуазейля

$$R_i = \frac{8l_i\eta}{\pi r_i^4}, \quad (4)$$

где l_i – длина, r_i – радиус соответствующей артерии; η – вязкость крови.

Величины сопротивлений R_1 , R_3 , R_5 , R_7 и R_9 малы, но они есть и могут быть рассчитаны по величине диаметра и длины каждого из участков аорты.

Основными сопротивлениями, влияющими главным образом на потоки крови в артериях являются сопротивления R_2 , R_4 , R_6 , R_8 и R_{10} .

Сопротивление R очень важно для организма человека и для дальнейших расчётов, так как используется во всех нижеследующих формулах (5–16). При его знании можно рассчитать падение давления крови ΔP_1 между луковицей аорты и началом правой подключичной артерии

$$\Delta P_1 = Q R_1, \quad (5)$$

откуда давление

$$P_1 = P - \Delta P_1 = Q (R - R_1). \quad (6)$$

Зная давление P_1 и сопротивление правой подключичной артерии R_2 уже можно рассчитать величину потока Q_1 через правую подключичную артерию

$$Q_1 = \frac{P_1}{R_2} = \frac{Q(R - R_1)}{R_2}. \quad (7)$$

Кроме того, это же давление P_1 участвует в создании потоков Q_2 , Q_3 , Q_4 и Q_5 . Но сначала нужно определить величину падения давления ΔP_2 между точками 2 и 3

$$\Delta P_2 = (Q - Q_1) R_3. \quad (8)$$

Тогда давление

$$P_2 = P_1 - \Delta P_2 = Q (R - R_1) - (Q - Q_1) R_3. \quad (9)$$

Зная P_2 можно рассчитать поток в правой общей сонной артерии Q_2

$$Q_2 = \frac{P_2}{R_4} = \frac{Q(R - R_1)}{R_4} + \frac{(Q - Q_1)R_3}{R_4}. \quad (10)$$

Давление P_2 используем для определения падения давления между точками 3 и 4

$$\Delta P_3 = (Q - Q_1 - Q_2) R_5 \quad (11)$$

и давление P_3

$$P_3 = P_2 - \Delta P_3 = Q(R - R_1) - (Q - Q_1)R_3 - (Q - Q_1 - Q_2)R_5. \quad (12)$$

По величине давления P_3 определяем поток Q_3

$$Q_3 = \frac{P_3}{R_6} = \frac{P_2 - \Delta P_3}{R_6} = \frac{Q(R - R_1)}{R_6} + \frac{(Q - Q_1)R_3}{R_6} + \frac{(Q - Q_1 - Q_2)R_5}{R_6}, \quad (13)$$

после чего находим ΔP_4 и P_4

$$\Delta P_4 = (Q - Q_1 - Q_2 - Q_3)R_7 \quad (14)$$

и

$$P_4 = P_3 - \Delta P_4 = Q(R - R_1) - (Q - Q_1)R_3 - (Q - Q_1 - Q_2)R_5 - (Q - Q_1 - Q_2 - Q_3)R_7. \quad (15)$$

По формулам (15) и (6) находим искомое отношение давлений в левой и правой руках ξP

$$\xi P = \frac{P_4}{P_1} = \frac{Q(R - R_1) - (Q - Q_1)R_3 - (Q - Q_1 - Q_2)R_5 - (Q - Q_1 - Q_2 - Q_3)R_7}{Q(R - R_1)} \quad (16)$$

Также можно найти и поток через левую подключичную артерию Q_4

$$Q_4 = \frac{P_4}{R_8}. \quad (17)$$

ИЗМЕНЕНИЯ АД У ЧЕЛОВЕКА В МОМЕНТ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ ПО МЕТОДУ КОРОТКОВА

Метод Н.С. Короткова, разработанный им еще в 1905 г, признан официальным методом клинических измерений **артериального давления** для диагностики. Однако, в момент измерения манжета тонометра полностью прекращает кровоток в круге правой или левой руки (в артерии, артериолах, капиллярах и венах). При этом нормальное распределение давления крови в кровеносной системе существенно нарушается. Поток крови проходит мимо артерии, на которую надета манжета, и она не оказывает на него никакого влияния. При этом на рис. 3 имеем $R_2 = \infty$, поток $Q_1 = 0$, а расчетная формула для общего периферического сопротивления R_{np} при измерении по правой руке принимает вид

$$R_{np} = R_1 + \frac{1}{0 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9 + R_{10}}}}}}}}}}}. \quad (18)$$

При измерении давления по левой руке ситуация аналогичная для круга правой руки и имеем

$R_8 = \infty$, а поток $Q_4 = 0$. Расчетная формула для общего периферического сопротивления $R_{лев}$ принимает вид

Расчёт периферического сопротивления артерий

| Кровеносный сосуд, сопротивление | Длина*, см | Внутренний радиус, см | Сопротивление R_i по формуле (4), $\text{г/см}^4 \cdot \text{с}$ |
|--|------------|-----------------------|--|
| Восходящая аорта, <i>aorta ascendens</i> , R_1 | 8,0 | 1,5 | 0,149 |
| Правая подключичная артерия, <i>a. Subclavia dextra</i> , R_2 | 162 | 0,88 | 25,452 |
| Дуга аорты (начало), <i>arcus aortae</i> , R_3 | 3,5 | 1,45 | 0,0746 |
| Правая общая сонная артерия, <i>a.carotis communis dextra</i> , R_4 | 95 | 0,75 | 28,289 |
| Дуга аорты (середина), <i>arcus aortae</i> , R_5 | 4,2 | 1,35 | 0,119 |
| Левая общая сонная артерия, <i>a.carotis communis sinistra</i> , R_6 | 95 | 0,75 | 28,289 |
| Дуга аорты (окончание), <i>arcus aortae</i> , R_7 | 3,5 | 1,25 | 0,1351 |
| Левая подключичная артерия, <i>a. subclavia sinistra</i> , R_8 | 162 | 0,83 | 32,162 |
| Грудная аорта, <i>aorta thoracalis</i> , R_9 | 4,5 | 1,24 | 0,179 |
| Брюшная аорта и остальные артерии большого круга, R_{10} | 116,2 | 1,23 | 4,784 |

* Длина подключичных, сонных и остальных артерий соответствует длинам их кругов кровообращения (l_{R_1} длина восходящей аорты плюс расстояние до входа в правую подключичную артерию, $l_{R_2} = l_{R_8}$ двойная длина от аорты до кончиков пальцев рук, $l_{R_4} = l_{R_6}$ двойная длина от аорты до макушки головы, $l_{R_{10}}$ длина с короткими участками кровотока в поглощающих много крови желудочно-кишечном тракте и в кровотоке почек). При расчёте по формуле (4) использовалось значение вязкости крови $\eta = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ г/см} \cdot \text{с}$

$$R_{\text{лев}} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{0 + \frac{1}{R_9 + R_{10}}}}}}}}}}}. \quad (19)$$

Расчет по этим формулам для параметров по таблице даёт $R_{\text{пр}} = 3,69169 \text{ г/см}^4 \cdot \text{с}$ и $R_{\text{лев}} = 3,53929 \text{ г/см}^4 \cdot \text{с}$. Таким образом, имеем соотношение общих периферических сопротивлений для трех вариантов схемы рис. 3

$$R < R_{\text{лев}} < R_{\text{пр}},$$

$$3,2587 < 3,53929 < 3,69169.$$

Это неравенство определенно утверждает, что во время измерения по любой руке артериальное давление в организме человека повышается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для численных расчётов различных гемодинамических показателей обычно пользуются средним субъектом с ростом 175 см и весом 75 кг. Для расчета ξP у такого мужчины по формуле (16) можно принять данные, приведенные в **таблице**.

Расчет сопротивления R по формуле (3) дал значение $R = 3,2587 \text{ г/см}^4 \cdot \text{с}$.

Сердце в организме среднего человека в состоянии покоя перегоняет приблизительно 5 л крови в минуту ($Q = 83,3 \text{ мл/с}$). Измерения регионарного кровотока [8] в покое показали, что головной мозг получает 14%, сердце 3,5–5%, верхние конечности 20%, желудочно-кишечный тракт 23%, почки 22%, кожа 4%, остальное (кости, жировая ткань, соединительная ткань и т.п.) – 14% от общего минутного объема. Поток в *aorta thoracalis* имеет величину 3,02 л/мин.

Таким образом, на различия в потоках крови к правой и левой рукам оказывают влияние сопротивления R_3 – R_7 (рис. 3). Сонные артерии R_4 и R_6 (обе), отбирая 0,8 л/мин, снижают поток крови и давление в подключичной артерии левой руки по сравнению с правой рукой.

Расчёт по формуле (2) дал значение давления $P = 271,449 \text{ мл} \cdot \text{г/с}^2 \cdot \text{см}^4$.

Расчёты по формулам (5-17) дали величины $Q_1 = 10,177 \text{ мл/с}$, $Q_2 = 8,964 \text{ мл/с}$, $Q_3 = 8,694 \text{ мл/с}$, $Q_4 = 7,414 \text{ мл/с}$, $P_1 = 259,037 \text{ мл} \cdot \text{г/с}^2 \cdot \text{см}^4$, $P_4 = 238,454 \text{ мл} \cdot \text{г/с}^2 \cdot \text{см}^4$.

Интересующая величина – отношение давлений на входах в подключичные артерии левой и правой рук у обычного (не левши) человека

$$\xi P = \frac{P_4}{P_1} = 0,92, \quad (20)$$

а отношение потоков крови через подключичные левую и правую артерии

$$\xi Q = \frac{Q_4}{Q_1} = 0,729. \quad (21)$$

Для проверки результатов формулы (20) было измерено артериальное давление у среднего мужчины, здорового по артериальному давлению, автоматическим цифровым тонометром «UA777 DIGITAL PRESSURE MONITOR» [2], что исключало субъективность визуальных отсчётов по стрелочным приборам. Условия измерения АД стандартные по инструкции [2], тёплый солнечный день, давление 760 мм рт. ст, без ветра.

Стандартное положение (манжета на правом предплечье, сидя, рука на столе) результат: 143/70–62.

Левая рука (с аналогичными условиями измерений) – результат: 124/70–62. Оба измерения были выполнены с интервалом 2 мин. Отношение давлений

$$\xi P = \frac{P_{\text{АДлев}}}{P_{\text{АДпр}}} = \frac{124}{143} = 0,87, \quad (22)$$

где $P_{\text{АДпр}}$ и $P_{\text{АДлев}}$ артериальное давление, измеренное соответственно по правой и левой руке.

Таким образом, имеется в наличии существенное различие давлений, измеренных по левой и правой рукам. **Артериальное давление** по левой руке составляет всего 87% от давления по правой руке. Что и требовалось доказать. Весьма важен факт, что при отношении на входе подключичных артерий давлений 0,92, отношение потоков крови, через эти артерии дало величину 0,729.

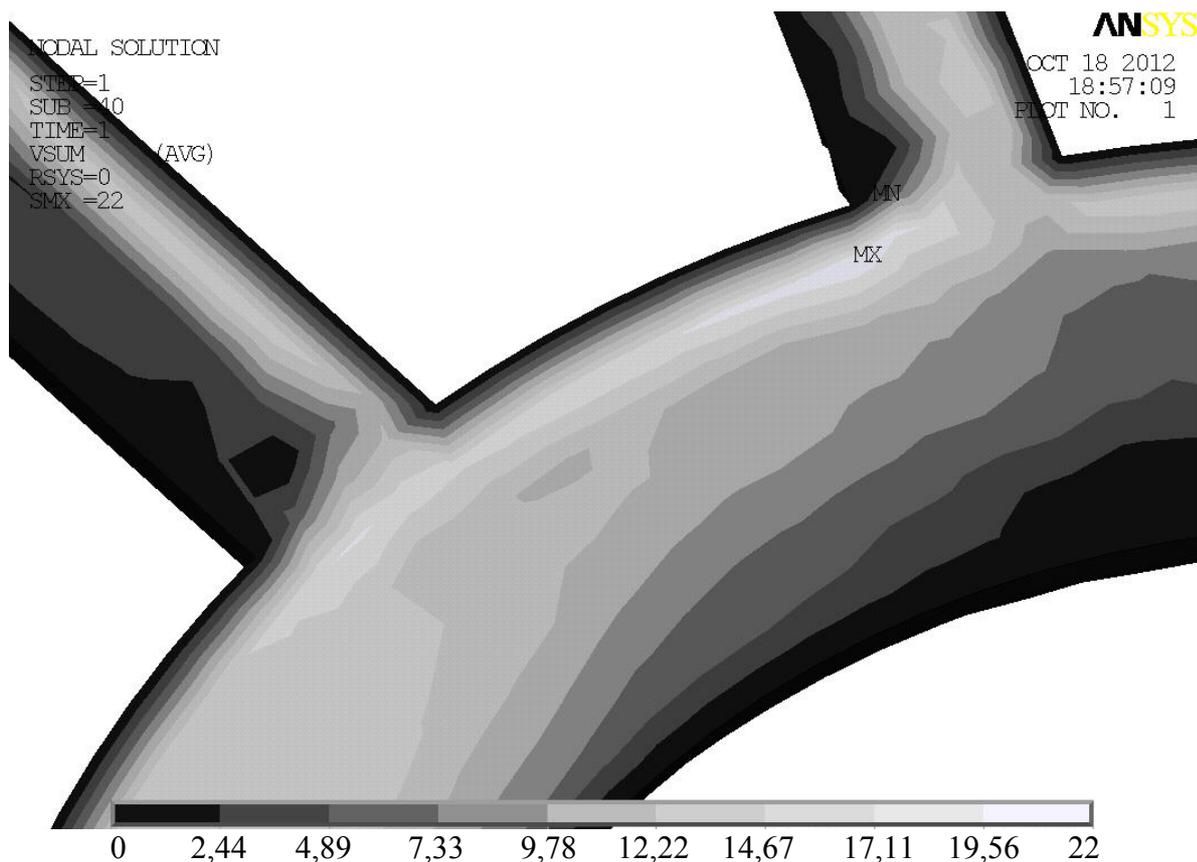


Рис. 4. Распределение суммарных скоростей потока крови на участке дуги аорты, в правой подключичной артерии и в правой общей сонной артерии, полученное в программном комплексе «ANSYS 13.0»

Таким образом, по формуле (20) видно, что давление в дуге аорты после прохождения кровью пути от артерии правой руки до артерии левой руки падает. Величины потоков крови, отходящей в артерии (21), изменяются более значительно. При этом поток крови в артерии левой руки почти на 27% ниже, чем такой же параметр в артерии правой руки.

Следует отметить, что отношение АД при измерениях физическим прибором в предплечьях рук (20) отличается от сосудистого давления на входах в соответствующие артерии схемы (рис. 3) электрогидравлических аналогий (20). Измерить в настоящее время *in situ* давления, эквивалентные (20), не представляется возможным.

Особенности описанного движения крови могут быть исследованы и посредством метода конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS в среде FLOTRAN [7].

Такое исследование позволяет также с некоторым приближением, но очень наглядно продемонстрировать распределение скоростей движения, давления и множество других параметров в 3-х мерном пространстве.

На рис. 4 представлен пример распределения суммарной скорости (*VSUM*) в участке дуги аорты, где расположены правая подключичная и правая общая сонная артерии. Видно, что в отличие от точного математического расчёта, где используется средние давление и скорости в поперечном сечении потока на входе в артерии имеется наличие особенностей распределения скоростей потока с увеличением скоростей вблизи внешнего (большого) радиуса по сравнению со скоростью вблизи от внутреннего (меньшего) радиуса. Кроме того имеются особенности течения вокруг мест входа потока в отходящие артерии.

Постановка и решение краевой задачи гемодинамики кровотока в дуге аорты выполнены по первому варианту решения в *FLOTRAN* см. п. 6.1.3 [7] (с жесткими стенками).

Модель была построена на дугообразной артерии со средним радиусом дуги 10 см и отходящими артериями в соответствии с данными таблицы. Была поставлена краевая задача, заданы граничные условия и построена тетраэдрическая неструктурированная вычислительная сетка.

Параметры крови: плотность $1,067 \text{ г/см}^3$, вязкость постоянная $3,7 \cdot 10^{-2} \text{ г/см} \cdot \text{с}$. Скорость на входе в восходящую аорту, *aorta ascendens* постоянная по площади входного сечения 20 см/с (на выходе из левого желудочка сердца - (луковицы аорты, *ostium aortae*) поток еще не сформировал параболу скорости). Узлы сетки на входной поверхности закреплены $U_x = U_y = U_z = 0$, давление на выходе $P_k = 0$ (полая вена). Компоненты скорости на стенках (условие прилипания) $V_x = V_y = V_z = 0$.

Показано наличие особенностей распределения скоростей потока с отличием скорости вблизи от внешнего (большого) радиуса по сравнению со скоростью вблизи от внутреннего (меньшего) радиуса потока с увеличением скорости вблизи от внешней стенки. Кроме того имеются особенности течения вокруг мест входа потока в отходящие артерии.

К вопросу о силе и работе рук.

Кислород в крови определяет механические параметры мышцы. При прекращении дыхания даже на 2–3 мин мышцы теряют функциональность, и наступает их смерть. С другой стороны в случае тяжелых физических нагрузок увеличение минутного объема крови (МОК) может достигать до 25 л/мин. Известно, что мышечный поток крови может возрасти даже двадцатикратно.

Для осуществления различных движений в организме человека, как у всех позвоночных животных имеются 3 вида мышечной ткани: скелетная, сердечная и гладкая, состоящих из мышечных волокон, которые способны сокращаться. К каждой мышце подходят кровеносные сосуды и нервы.

Сокращаясь, мышца действует на кость как на рычаг и производит механическую работу. Любое мышечное сокращение связано с расходом энергии. Источниками этой энергии служат процессы окисления и распада органических веществ (углеводов, жиров, нуклеиновых кислот).

Протекающая через мышцы кровь снабжает их кислородом и питательными веществами и уносит углекислый газ и другие продукты распада. Чем больше поток крови в мышце, тем большую работу может она выполнить, тем сильнее она становится.

Таким образом, большее количество кислорода, принесённого к мышцам правой руки, по сравнению с количеством кислорода, принесённого к мышцам левой руки, определяет большую механическую силу в правой руке по сравнению с левой рукой.

Помимо рассмотренного выше примера развития аорты и отходящих от неё артерий известны некоторые отклонения в строении рассмотренной системы:

1. Правая подключичная артерия и правая общая сонная артерия отходят не прямо от аорты, а от плечеголового ствола (*truncus brachiocephalicus*) (безымянная артерия *a. anonyta* (*BNA*)) через бифуркацию;
2. Плечеголовой ствол отходит не с правой стороны, а с левой.
3. Еще реже наблюдаются два плечеголовных ствола.

Естественно, что в каждом из этих вариантов строения системы кровообращения будут в наличии различные схемы по рис. 3, а также различные формулы расчёта периферического сопротивления сосудов по (4) и отличающиеся окончательные результаты сопротивления R при одинаковых начальных данных Q .

БИОМЕХАНИКА ЛЕВШИ

Всё сказанное выше было доказательством положения, почему именно правая рука сильнее левой, а каким образом могут появляться левши?

Из п. 4 видно, какие странные и непонятные варианты жизни появляются в разных условиях существования. Так что левши появляются именно в случаях возникновения непредвиденных отклонений различных условий, влияющих на повышение давления и потока крови в левой руке. Тогда левая рука может стать и сильнее и ловчее правой.

Такие отклонения могут быть, например, в следующих случаях.

1. По причине опять же природных отклонений артерия левой руки может иметь больший диаметр на входе и на расстоянии от него. Тогда, даже при меньшем давлении в дуге аорты на входе в артерию левой руки в нее будет поступать кровь с большим потоком, чем в правую, и в мышцах левой руки будет наблюдаться более интенсивное кровоснабжение.

Такой вариант довольно легко реализуется в связи с чрезвычайно сильной зависимостью (4) сопротивления в артерии от радиуса (в 4-й степени!!). Например, при сохранении параметров артерий по таблице, и отношения давлений по формуле (20) $P_4/P_1 = 0,92$, поток Q_4 будет больше, чем Q_1 , если у левши внутренний радиус левой подключичной артерии будет всего на 8,2% больше, т.е., не 0,83 см, как по таблице, а 0,898 см. Это и есть реальный случай условий биомеханики и появления среди праворуких и левши.

2. Родители левши (отец или мать) до его рождения имели работу, связанную с большей нагрузкой на левую руку, в результате чего левая рука искусственно стала сильнее и ловчее, что передалось по наследству.

3. Такие изменения органов известны. Например, профессиональные музыканты на духовых инструментах имеют резкое отклонение в размерах лёгких, так как они заставляют лёгкие совершать работу по генерации звуков на трубе или тромбоне. Поэтому, для получения большего запаса воздуха лёгкие изменяют свои размеры.

4. И, наконец, по каким либо причинам, детям приходится с раннего возраста, что-то делать всё время левой рукой вместо того, чтобы это делать правой рукой. А с возрастом эта непонятная привычка у человека входит в норму и человек становится левшой.

5. Ну, а, кроме того, во многих случаях человеку нужно иметь одинаковой силы и правую и левую руки. Например, тяжелоатлету, поднимающему тяжёлые штанги двумя руками. Ему приходится много лет тренировать левую руку, чтобы она не отставала в силе от правой, что она и начинает делать опять же путём увеличения диаметра артерии и повышения в ней артериального давления.

6. Редкие случаи, но также известны. Правостороннее расположение сердца, тогда автоматически правая рука и левая меняются ролями.

ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ У ЛЕВШИ

При измерении артериального давления у левши предполагаем, что поток $Q_4 > Q_1$, например, $Q_4 = 11$ мл/с. Однако, в момент измерения по левой руке он прекращается, а прибор покажет меньшую величину АД.

Расчет таков.

При измерении давления у левши на левой руке, давление P_4 равно

$$P_4 = [(Q - Q_4) - (Q_1 + Q_2 + Q_3)] \cdot (R_9 + R_{10}) = 44,465 \cdot 4,963 = 220,68 \text{ мл} \cdot \text{г} / \text{с}^2 \cdot \text{см}^4,$$

а давление $P_1 \approx 259 \text{ мл} \cdot \text{г} / \text{с}^2 \cdot \text{см}^4$, т.е., $P_4/P_1 = 0,85$.

При рассмотрении вопроса о силе и работе рук в п. 4 выдвинуто положение, что чем больше поток крови в мышце, тем большую работу может она выполнить, тем сильнее она становится. А в пп. 1 п. 5 показано, что только из-за увеличения радиуса артерии левой руки всего на 8,2% поток крови через неё будет больше, чем поток крови через артерию правой руки и по этой причине человек может стать левшой.

Удалось найти двух человек, имеющих критерии левши.

Первый – женщина Марина Н., 27л, рост 168 см, вес 58 кг. Марина Н. отлично работает в предприятии полиграфии на компьютере левой и правой руками и сообщила важные сведения, что «левшей много, только они скрывают это». Таким образом, само существование левши весьма деликатная проблема. Например, измерять артериальное давление она отказалась и назвать известных ей левшей также. Определить тот факт, что она левша, удалось лишь по тому, как она стала выписывать чек в кассу для оплаты за свои услуги. Она писала чек левой рукой.

Второй – Юрий П., 51 л, рост 185 см, вес 90 кг. Его давление по прибору UA-777 по правой руке 132×75×68, а по левой руке 11878×69.

Таким образом, есть реальное подтверждение результатов исследований, изложенных в статье.

Выводы

1. Приведённые выше результаты исследования убедительно доказывают положение о том, что давление крови в правой руке имеет более высокое значение, чем в левой, поэтому в практику медицинских измерений артериального давления следует более уверенно ввести указание на обязательное правило измерения АД на предплечье правой руки.

2. Конечно, в случае отклонений в развитии, как у левши, такое правило может изменяться, но для этого необходимо получить сведения у пациента, что он левша по положению сердца.

3. У обычного же левши даже при давлении на входе в левую подключичную артерию меньше, чем в правую подключичную артерию, поток крови через левую артерию может быть больше и левая рука будет функционировать сильнее и ловчее, чем правая, почему он и стал левшой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прибор для измерения артериального давления. Модели LD-70, LD-70NR, LD-71, LD-71A. Руководство по эксплуатации. – Little Doctor International (S) Pte. Ltd., 2010. – 11 с.
2. UA-777 DIGITAL PRESSURE MONITOR. Методическое руководство по точному измерению артериального давления. A&D Company Ltd. – Tokyo: Japan, 2007. – 30 с.
3. Цузмер А.М., Петришина О.Л. Человек: анатомия, физиология, гигиена. – М.: Просвещение, 1988. – 241 с.
4. Филатова О.В., Требухов А.В, Киселев В.Д. Взаимодействие давления и потока в регуляции диаметра крупных артериальных сосудов. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2003. – 137 с.
5. Математическая энциклопедия / гл. ред. И.М. Виноградов. – М.: Сов. энцикл., 1982. – Т. 3. – 1183 с.
6. Корн Г., Корн К. Справочник по математике. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
7. Каменский А.В., Сальковский Ю.Е. Практическое применение конечно-элементного пакета ANSYS к задачам биомеханики кровеносных сосудов: учеб.-метод. пособие для студ. естественных факультетов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2005. – 100с.
8. Фолков Б., Нил Э. Кровообращение. – М.: Медицина, 1976. – 463 с.

BIOMECHANICS OF THE LEFTHANDER

V.G. Gratsinskiy (Saratov, Russia)

The purpose of this paper is to clarify the biomechanical features of symmetric organs functioning – the right and left hands. The main cause of symmetry deviation is explored: different arterial blood pressure in the arteries, providing blood to hand. The biomechanical possibilities of the appearance of left-handed features development are considered, when a human left arm is stronger and agile than right, as opposed to other people. This variant is possible if the blood stream through the left subclavian artery with a lower AP at its input in comparison with AP at the input to the right hand, will be more than the right hand. The experimental results confirming the research conclusions are described. Medical recommendations on the implementation one of the basic clinical procedures – arterial pressure measurement are made.

Key words: biomechanics, arterial pressure, an aortic arch, the lefthander.

Получено 16 октября 2012