

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КРОВЯНОГО ДАВЛЕНИЯ

Владимир Львовский

Кровеносные сосуды человека являются транспортной системой для снабжения кислородом и кровью всех участков организма, в том числе и сердца. Реакция сосудов в статье исследуется методами биомеханики.

Кровеносные сосуды расположены в мышечных и других тканях человека, в основном, без зазоров и испытывают противодействия со стороны тканей. При возрастании кровяного давления p_B кровеносные сосуды, обладая упругими свойствами, должны увеличиваться в диаметре и повышать давление на окружающую их упругую среду, что привело бы к постоянным болям в тканях организма тем более, что давление крови в артериях изменяется с частотой пульсации сердца. Как объяснить, что человек не чувствует расширения сосудов и пульсирующего изменения давления на мышечные ткани?

1. Рассмотрим глаз – выдвинутую часть мозга – через который исследователь может наблюдать и фотографировать работу глазной артерии при изменении в ней кровяного давления, вызванного работой сердца, а также реакцию артерии при изменении внутриглазного давления (ВГД).

Экспериментальные исследования известных офтальмологов XX века Леопольда [1], Нестерова [2], Кларка [3], Фриденвальда [4] показали, что при повышении ВГД диаметр глазной артерии не изменяется. Другие офтальмологи: Мозес[5], Глостер [6] считали, что при повышении кровяного давления от диастолического до систолического и при повышении ВГД диаметр глазной артерии изменяется, а склеральная оболочка глаза не деформируется.

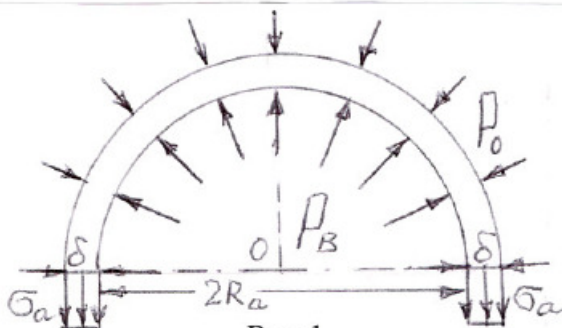
В 1974г. автор совместно с профессором-офтальмологом Дашевским А.И. приняли концепцию, что в возникновении ВГД играют роль как упругие свойства склеральной оболочки, так и упругие свойства кровеносных сосудов [7]. Нами было экспериментально и теоретически установлено, что при изменении давления крови в глазной артерии её диаметр не изменяется и внутриглазное давление (ВГД) остается практически неизменным при диастолическом p_{BD} и систолическом давлениях крови p_{BC} , равных соответственно 35 и 65 мм рт. ст. Что же происходит в кровеносных сосудах глаза?

Артерия является тонкостенной цилиндрической оболочкой, находящейся под давлением крови p_B изнутри и ВГД p_o снаружи.

Окружные напряжения в стенке артерии (Рис.1) определяются по формуле

$$\sigma_a = (p_b - p_o)R_a / \delta_a, \quad (1)$$

где R_a - радиус артерии, δ_a - толщина стенки артерии.



По закону Гука окружные напряжения в стенке оболочки равны произведению модуля упругости ткани артерии E_a на радиальную деформацию сечения артерии ε_a :

$$\sigma_a = E_a \varepsilon_a, \quad (2)$$

Выразим деформацию ε_a через изменение объёма артерии $\Delta V_a^{i,p}$:

$$\varepsilon_a = \Delta V_a^{i,p} / 2V_a^i \quad (3)$$

Из формулы (2) с учётом формул (1) и (3) определяем E_a :

$$E_a = 2(p_B - p_o)R_a V_a^i / (\Delta V_a^{i,p} \delta_a) \quad (4)$$

Запишем выражение для модуля упругости артерии (4) при систолическом и диастолическом давлениях крови E_a^{BC} и E_a^{BD} и определим отношение этих модулей упругости. После преобразований получим простую формулу:

$$E_a^{BC} / E_a^{BD} = (p_{BC} - p_o) / (p_{BD} - p_o). \quad (5)$$

Для здорового глаза среднее систолическое давление крови в артерии глаза $p_{BC} = 65$ мм рт.ст., диастолическое - $p_{BD} = 35$ мм рт.ст., ВГД $p_o = 15$ мм рт.ст. Тогда из (5) получаем отношение модулей упругости и отношение систолического и диастолического давлений

$$E_a^{BC} / E_a^{BD} = (65 - 15) / (35 - 15) = 2,5 \quad \text{и} \quad p_{BC} / p_{BD} = 65 / 35 = 1,857.$$

Таким образом, упругие силы в кровеносных сосудах глаза с запасом в $2,5/1,857=1,346$ компенсируют рост кровяного давления в них. Этим автор объясняет экспериментально установленный факт, что диаметр артерии не изменяется при изменении давления крови в них.

При глаукоме внутриглазное давление $P_{гл} = 25 - 40$ мм рт.ст. Если ВГД превышает 35мм рт.ст., то есть больше диастолического, артерия обескровливается, что мы наблюдали при эксперименте.

2. Рассмотрим реакцию кровеносных сосудов мозга на изменение кровяного давления. Главная кровеносная артерия окружена мозговым веществом (рис. 2). Автор после длительных раздумий пришёл к выводу, что артерия мозга испытывает противодействие со стороны мозгового вещества. При развитии плода развиваются и мозг, и кровеносные сосуды внутри него.

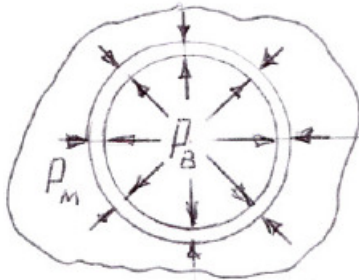


Рис.2

При первом наполнении артерии кровью она превращается в наполненную кровью цилиндрическую оболочку круглого поперечного сечения, объём которой больше объёма тканей ненаполненной. В связи с этим возникает внутримозговое противодействие P_M . Артерия мозга находится под давлением крови P_B изнутри и давления мозга P_M снаружи. Окружные напряжения в оболочке артерии определяются по формуле, аналогичной формуле (1)

$$\sigma_{am} = (p_{BM} - p_M)R_a / \delta_a. \quad (6)$$

Ввиду значительной длины кровеносных сосудов мозга учтём и продольные напряжения в стенках артерий σ_z , возникающие от сопротивления току крови. Принимаем, что продольные напряжения составляют некоторую часть от окружных, то есть $\sigma_z = \nu \sigma_a$. Обобщённый закон Гука [8] в этом случае записывается в виде:

$$\varepsilon_a = (\sigma_a - \mu_a \sigma_z) / E_a = \frac{\sigma_a}{E_a} (1 - \mu_a \nu), \quad \sigma_a = \frac{E_a \varepsilon_a}{1 - \mu_a \nu}, \quad (7)$$

где μ_a - коэффициент Пуассона (поперечной деформации) ткани артерии.

Вся трудность дальнейшего исследования заключается в том, что автор не может экспериментально определить внутримозговое давление P_m , то есть противодействие мозга на артерию, как определял внутриглазное давление с помощью тонометра, а в литературных источниках не нашёл сведений об этом. Так как глазная артерия и сам глаз являются внешней частью мозга, автор предполагает, что систолическое и диастолическое давления крови в мозговых артериях равны приблизительно соответствующим давлениям крови в глазных артериях, а давление мозгового вещества на артерии должно быть близким к величине среднего внутриглазного давления. В этом случае по формуле (5), можно определить отношение модулей упругости ткани кровеносных артерий мозга при систолическом и диастолическом давлениях крови в мозговых артериях. Как показано выше в пункте 1 для глазной артерии, отношение модулей упругости при систолическом и диастолическом давлениях крови будет равно 2,5 при отношении давлений крови, равном 1,857. Таким образом, упругие силы кровеносных сосудов мозга с запасом в 1,34 раза перекрывают рост кровяного давления в них.

Допустим, что вышепринятое предположение автора не имеет места, систолическое давление крови в артериях мозга равно 120 мм р. с., диастолическое равно 80, а противодействие мозгового вещества находится в пределах 15-30мм.р.с. Тогда получаем следующие результаты. При $P_m=15$ отношение модулей упругости ткани артерии

$E_a^C / E_a^D = (120 - 15) / (80 - 15) = 105 / 65 = 1,62$; а отношение давлений крови $P_c / P_D = 120 / 80 = 1,5$; Запас компенсации равен $1,62 / 1,5 = 1,08$.

При $P_m=30$ ммр.с. получаем: $E_a^C / E_a^D = (120 - 30) / (80 - 30) = 90 / 50 = 1,80$

Отношении давлений $PBC / PBD = 1,5$; запас компенсации: $1,8 / 1,5 = 1,2$.

Аналогичные результаты можно получить при исследовании реакции кровеносных сосудов в мышечных тканях.

Исследования и расчёты позволяют сформулировать следующую закономерность: При изменении давления крови от систолического до диастолического упругие свойства тканей кровеносных сосудов (модули упругости) саморегулированием изменяются таким образом, что их отношение с некоторым запасом компенсирует изменение давления в кровеносных сосудах, что обеспечивает неизменность диаметров сосудов.

Источники

1. Leopold J.H. Trans. Am. Ophthalm. Soc. 1945, V.40, p.625-672.
2. Нестеров А.П. Гидродинамика глаза. М., Медицина, 1967.
3. Clark J. Am. Physiology, 1932, V.41, p.474.
4. Friedenvald J. Am. J. Ophthalm., 1937, V.20, p.985.
5. Moses R. Tr. Am.Acad. Ophthalm., 1961, p.527.
6. Gloster I. Tonometry and Tonography, London, 1967.
7. Львовский В.М., Дашевский А.И. Применение теории оболочек к исследованию физических основ тонометрии глаза, СМТС, вып. 25, Киев, 1975. с.7-14.
8. Львовский В.М. Явление саморегулирования упругих свойств склеры и кровеносных сосудов глаза. Сб. «Второе дыхание», MCRSS, Бостон, 2005, вып 8-9, с.85-90.