

Муниципальное бюджетное образовательное учреждение «Лицей № 159»



Направление: исследовательский проект по физике

«Физика внутри нас: сердечно-сосудистая система»

Автор:

Сиберт Александра,
МБОУ «Лицей № 159»,
8 класс «Г»,
Центральный округ г.
Новосибирска

Консультант проекта:

Денк Ирма Эвальдовна,
учитель физики
высшей квалификационной
категории
Контактный телефон
руководителя:
+7-913-926-15-45

г. Новосибирск, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Физика - наука о природе, а человек - неотъемлемая часть этой природы. Организм человека - невероятно сложная и запутанная система, которая до сих пор ставит в тупик докторов и исследователей, несмотря на то, что ее изучают уже не одну сотню лет. Оказывается, многое в нем подчиняется законам физики, в т.ч. и работа сердечно-сосудистой системы (далее по тексту ССС).

Цель исследования:

1. Определить физические законы и процессы в кровеносной системе человека и выяснить значение физических факторов, обуславливающих непрерывное движение крови в организме, т. е. рассмотреть систему кровообращения глазами физиков.

2. Провести эксперименты по измерению и расчетам различных показателей работы сердца и ССС у подростков и взрослых с разной физической активностью и убедиться, что умеренные спортивные и физические нагрузки, а также двигательная активность улучшают состояние и деятельность ССС.

Материалы исследования:

1. Богданов К.Ю. «Физик в гостях у биолога», Москва «Наука», 1986
2. Кац Ц.Б. «Биофизика на уроках физики», Москва «Просвещение», 1974
3. Коржуев А. «Физика и биофизика», Санкт-Петербург «ГЭОТАР-Медиа», 2010
4. Ланда Б.Х. «Методика комплексной оценки физического развития и физической подготовленности», Москва «Советский спорт», 2011
5. Аулик И.В. «Определение физической работоспособности в клинике и спорте», Москва «Физкультура и спорт», 1990

Методы исследования:

- теоретические: сбор, изучение и анализ собранного материала из различных источников (литература, справочники);
- экспериментальные: постановка различных экспериментов с участием школьников и взрослых, анализ полученных результатов;

- математические и информационно-компьютерные: статистика, программирование расчетов, создание онлайн-теста.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ И ПРОЦЕССЫ В РАБОТЕ СРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

Строение сердечно-сосудистой системы

Сердце начинает функционировать задолго до рождения и прекращает работу последним. Обладая собственным автоматизмом, оно может работать даже после смерти организма.

Сердечно-сосудистая (кровеносная) система состоит из *сердца* - главного мышечного органа кровообращения, и *кровеносных сосудов* (*артерий, артериол, капилляров, венул и вен*) - полых трубок различного диаметра, по которым происходит циркуляция крови. Сердце заставляет кровь двигаться, ритмически нагнетая ее в кровеносные сосуды.

Артериальное давление и его роль в движении крови по сосудам

Артериальное давление - один из важнейших параметров, характеризующих работу ССС. Давление крови определяется объёмом крови, перекачиваемым сердцем в единицу времени, и сопротивлением сосудистого русла. Вследствие сопротивления кровеносных сосудов передвижению крови в них создается кровяное давление, которое называют *артериальным*. Сопротивление кровотоку зависит от диаметра сосудов, их длины, тонуса, а также от объема циркулирующей крови и ее вязкости. Поэтому величина артериального давления неодинакова в разных отделах сосудистого русла.

Поскольку кровь движется под влиянием давления в сосудах, создаваемого сердцем, то наибольшее давление крови будет в аорте, несколько меньшее давление будет в артериях, ещё более низкое в капиллярах, а самое низкое в венах. Разность давления в артериях и венах является основной причиной

непрерывного движения крови по сосудам [1]. Таким образом, согласно законам физики, кровь движется от артерий к венам.

Верхнее число - *систолическое артериальное давление (СД)*, показывает давление в артериях в момент, когда сердце сжимается и выталкивает кровь в артерии, оно зависит от силы сокращения сердца, сопротивления стенок кровеносных сосудов, и числа сокращений в единицу времени. Нижнее число - *диастолическое артериальное давление (ДД)*, показывает давление в артериях в момент расслабления сердечной мышцы.

Сердце и кровеносные сосуды - это насос и сообщающиеся сосуды

Наше *сердце* - это насос, устройство которого можно сравнить с работой поршневого жидкостного насоса, действие которого основано на том, что под воздействием атмосферного давления вода в трубке поднимается за поршнем.

Аналогично происходит работа сердца. Сердце образовано особой мышечной тканью, которая способна ритмично сокращаться. Работа сердца характеризуется циклом, состоящим из двух этапов: фаза сокращения предсердий и желудочков, фаза расслабления предсердий и желудочков.

Сердце прокачивает кровь по сосудам тела. Делает оно это с помощью сокращений, как насос «проталкивая» порции крови по кровеносным сосудам.

Диаметр артерии (аорты) составляет около 1,5 см. Аорта разветвляется на артерии меньшего диаметра, расположенные в теле симметрично. От них ветви сосудов отходят до костей, мышц, суставов, внутренних органов. Мельчайшие артерии называют артериолами, из них кровь поступает к сети капилляров. Кровь движется по сосудам непрерывно по двум замкнутым кругам кровообращения - малому и большому. Соответственно, *кровеносные сосуды представляют собой сообщающиеся сосуды, по которым протекает кровь.*

Итак, сердце состоит из двух частей и имеет две кровеносные системы (два круга кровообращения): правая половина сердца качает кровь по сосудам по всему телу, до конечностей, левая половина - через легкие, для обогащения крови

кислородом. Таким образом, *всю сердечно-сосудистую систему можно назвать «насос и сообщающиеся сосуды»*. При этом принцип работы системы основан на законе гидродинамики в сообщающихся сосудах: *жидкость течет из сосуда с большим давлением в сосуд с меньшим давлением*.

Силы, возникающие при движении крови по сосудам:

сила трения (сопротивления) и сила давления

Движение крови по сосудам подчинено законам гидродинамики и определяется двумя силами [1]:

1. *Силой трения или силой сопротивления*, которое кровь испытывает при трении о стенки сосудов. При движении крови по сосудам возникает сила трения, которая препятствует перемещению крови, в результате скорость ее течения становится меньше.

2. *Силой давления*, влияющей на движение крови. Кроме силы трения на жидкости, как и на все тела на Земле, действует сила тяжести. Поэтому каждый слой крови в сосудах своим весом создает *давление* на другие слои. Это давление по закону Паскаля передается по всем направлениям одинаково.

Пульсовая волна

и скорость ее распространения в соответствии с формулой Юнга

После каждого сокращения сердца вдоль артерии от сердца идет волна деформации, подобно тому, как идут волны от удара камня о воду. Сосуды создают пульсовые волны. Удары этих волн мы ощущаем, приложив палец у основания большого пальца на запястье или боковой поверхности шеи - это пульс. Пульс является основным показателем здоровья человека.

Пульс - это колебания стенок сосудов, вызванные изменением давления крови в результате работы сердца. Процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени называется волной. Источником пульсовых волн является сердце. Пульсовая волна - это поперечная волна, в которой колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения.

Оказывается, *скорость распространения пульсовой волны зависит от упругости артериальной стенки, поэтому может служить показателем ее состояния при различных заболеваниях* [2]. Формула для скорости распространения пульсовых волн была выведена знаменитым английским ученым, практикующим врачом и физиком, Томасом Юнгом в 1809 г.:

$$v^2 = \frac{Eh}{\rho d} \quad (1)$$

где v - скорость, E - модуль Юнга, h - толщина стенки, ρ - плотность, d - внешний диаметр артерии.

Скорость пульсовой волны зависит от упругости стенки артерии, ее модуля Юнга. С возрастом, а также при тяжелых сердечно-сосудистых заболеваниях, сопровождающихся потерей упругости стенки артерий (увеличением жесткости), скорость v может увеличиваться в 2-3 раза по сравнению с нормой. Таким образом, *увеличение жесткости сосудов ведет к увеличению скорости распространения пульсовой волны*. Это позволяет использовать измерение скорости распространения пульсовой волны для определения жесткости сосудов и, соответственно, для постановки диагноза и выбора правильного лечения.

Возникновение аневризмы как проявление закона Лапласа

Пульсовые волны повторяются около 100 тысяч раз за сутки и около 2,5 млрд. в течении жизни. Подобную нагрузку стенки сосудов способны выдержать. Но иногда стенка начинает расширяться, образуя аневризму - расширение, которое прогрессирует, и со временем, не выдержав, сосуд лопается, что приводит к смерти. Обычно это бывает в зрелом возрасте [3].

Рост аневризмы - заболевание, объясняемое еще одним физическим законом - законом Пьера-Симона Лапласа, французского математика, физика и астронома, открывшего зависимость между напряжением T (отношение силы к площади сечения стенки сосуда), растягивающим стенку кровеносного сосуда, радиусом сосуда R , давлением внутри сосуда p и толщиной его стенки h :

$$T = \frac{pR}{h} \quad (2)$$

Из закона Лапласа следует, что при увеличении давления p должно увеличиваться и T , что приводит к растяжению стенки сосуда и увеличению его радиуса R . Но т. к. объем стенки аорты можно считать постоянным, то увеличение ее радиуса должно сопровождаться утончением стенки, что в свою очередь ведет к разрыву сосуда и появлению аневризмы. Таким образом, *причиной возникновения аневризмы является не только возросшая амплитуда артериального давления, но и изменение механических свойств артериальной стенки.*

Зависимость скорости кровотока от размеров сечения сосудов

Движение крови по сосудам напоминает движение воды по водопроводу. Согласно закону Паскаля, неподвижная жидкость в сосуде передает внешнее давление одинаково во всех направлениях.

Пусть v_1 - скорость крови через сечение сосуда S_1 , v_2 - скорость крови через сечение S_2 . Так как кровь практически несжимаема, то количество крови, проходящее за время t через поперечное сечение S_1 , равно количеству крови (жидкости), проходящей за это же время через сечение S_2 . Значит, объемы вытесненной крови за время t равны:

$$V_1 = S_1 l_1 = S_2 l_2 = V_2 \quad (3).$$

Так как $l_1 = v_1 t$ и $l_2 = v_2 t$, то, подставляя выражения в формулу (3), получаем

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \text{или} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (4)$$

Данное уравнение называется уравнением неразрывности. Из него следует, что *при стационарном течении жидкости скорости движения ее частиц через разные поперечные сечения трубы обратно пропорциональны площадям этих сечений. Т.е. при прохождении узких частей сосуда скорость кровотока больше и наоборот.*

Закон Бернулли в кровообращении

Из предыдущего раздела следует, что на кровь, поступающую в более узкую часть сосуда, действует со стороны крови, еще находящейся в широкой части сосуда, некоторая сила [3]. Этой силой, в данном случае, является разность между силами давления крови в широком и узком сечениях сосуда. Т.к. $F_{\text{давл}} = pS$ (5), то разность между силами давлений крови в различных частях сосуда равно:

$$\Delta F_{\text{давл}} = S \cdot (p_1 - p_2) \quad (6)$$

Так как сила направлена в сторону узкой части сосуда, то на широком участке сосуда давление должно быть больше, чем в узком:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (7)$$

Из уравнения следует, что

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (8)$$

Следовательно, можно сделать вывод: *при стационарном течении крови в тех местах, где скорость кровотока меньше, давление в крови больше и, наоборот, там, где скорость кровотока больше, давление в крови меньше.* К этому выводу относительно движения жидкости впервые пришел Даниил Бернулли, поэтому *данный закон называют законом Бернулли.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

В экспериментальной части работы участвовали 22 человека - ученики 7-го и 11-го классов и трое взрослых, среди которых 16 человек занимаются спортом или иным видом физической активности. У всех участников были измерены пульс и общее артериальное давление в покое и пульс после десяти приседаний. С помощью этих показателей, а также показателей массы, роста и возраста участников я провела расчеты и оценку нескольких параметров работы ССС: степени тренированности сердца, коэффициента выносливости [5],

адаптационного потенциала и работоспособности сердца [4]. Также рассчитала ударный объем крови (УОК), энергетические затрат и КПД организма при выполнении механической работы [3].

Приведу лишь некоторые из них:

1. Оценка адаптационного потенциала ССС.

Расчет по формуле

$$АП = 0,011 \cdot ЧСС1 + 0,014 \cdot (СД + В) + 0,008 \cdot ДД + 0,009 \cdot (М - Р) - 0,273 \quad (9),$$

где ЧСС - частота пульса в покое в положении сидя, СД - систолическое (верхнее) давление, ДД - диастолическое (нижнее) давление, В - возраст, М - масса тела, Р- рост, и оценка адаптационного потенциала показали, что только у 6% участников со спортивной и физической активностью есть напряжение механизмов адаптации, в то время как среди участников без активности этот показатель составляет уже 33% (Диаграммы 1 и 2):



Диаграмма 1



Диаграмма 2

2. Определение ударного объема крови, энергетических затрат и КПД организма при выполнении механической работы.

На основании измерений частоты пульса и общего артериального давления участников в покое и после подъемов по лестнице на один этаж были рассчитаны по указанным ниже формулам ударные объемы крови (УОК), а также энергетические затраты и КПД организма при подъеме по лестнице:

1) Ударный объем крови (УОК) по формулам Старра:

$$V_{y\delta} = 90,97 + 0,54 \cdot P_{nd} - 0,57 \cdot P_{od} - 0,61 \cdot B \text{ (для взрослых),}$$

$$V_{y\delta} = 40 + 0,54 \cdot P_{nd} - 0,57 \cdot P_{od} + 3,2 \cdot B \text{ (для детей в возрасте 7-15 лет)} \quad (10)$$

2) Работа A , совершаемая человеком при подъеме по лестнице:

$$A = mgH = mghn \quad (11)$$

3) Энергетические затраты Q при выполнении механической работы:

$$Q = K \cdot 19,684 \cdot t \cdot (V_1 f_1 - 0,6 V_0 f_0) \cdot 0,064 / 25000 \quad (12)$$

4) КПД человека при подъеме по лестнице:

$$\square = \frac{A}{Q} \cdot 100\% \quad (13)$$

Каждый участник с 5-ти-минутным перерывом для отдыха совершил три подъема по лестнице с различной скоростью и временем. Исследование показало, что УОК возрастал во время подъемов по лестнице по сравнению с состоянием покоя. А проведенный эксперимент подтвердил мнение физиков и медиков о том, что под влиянием физических нагрузок КПД сердца может увеличиваться в 1,5-3 раза. А наибольший КПД продемонстрировал 47-летний участник, раз в неделю занимающийся плаванием, что доказывает приобретение дополнительных возможностей сердца под влиянием умеренных спортивных нагрузок (Таблица 7):

№ п/п	Пол участника, возраст, физическая активность	A (кДж)	№ экста	t (с)	f (уд/мин)	P_{ca} (мм.рт.ст)	P_{dd} (мм.рт.ст)	$V_{y\delta}$ (мл)	Q (кДж)	\square (%)
1	Ж, 13 лет, не занимается	1,372	1 пок	-	75	108	65	67,77	9,691	14,16
			1 раб	9,54	83	122	56	85,32		
			2 пок	-	79	111	62	72,72	4,704	29,17
			2 раб	6,94	90	117	69	68,19		

			3 пок	-	73	97	60	67,38	3,875	35,41
			3 раб	4,44	81	123	62	79,20		
2	М, 47 лет, плавание	2,003	1пок	-	66	117	66	52,22	5,119	39,13
			1 раб	11,7	70	123	67	54,35		
			2 пок	-	69	120	66	53,84	3,171	63,17
			2 раб	7,8	70	114	67	54,89		
			3 пок	-	64	121	67	53,27	2,278	87,93
			3 раб	4,9	67	134	69	58,07		
3	Ж, 47 лет, не занимается	1,399	1пок	-	69	116	66	51,68	5,235	26,72
			1 раб	11,22	70	130	68	57,02		
			2 пок	-	72	126	74	48,20	3,939	35,52
			2 раб	8,51	73	130	71	53,69		
			3 пок	-	72	119	70	48,86	3,579	39,09
			3 раб	6,16	72	138	68	61,34		

Таблица 7. «Результаты измерений ударного объема крови, энергетических затрат и коэффициента полезного действия организма при выполнении механической работы»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривая сердечно-сосудистую систему человека как объект изучения физики, я пришла к выводу, что многие процессы, происходящие в ней, подчиняются физическим законам. Каждый организм индивидуален, но любой человек может улучшить качество своей жизни, изменив свой взгляд на физическую составляющую кровеносной системы.

На основании результатов исследований и проведенных экспериментов можно сделать вывод: процессы, которые протекают в сердечно-сосудистой системе человека, можно объяснить с помощью законов физики; умеренные спортивные и физические нагрузки, а также двигательная активность улучшают состояние и деятельность сердечно-сосудистой системы человека.

Для расширения теоретических знаний и практических навыков учащихся о физических законах и процессах в работе сердечно-сосудистой системы я разработала и разместила на личном сайте онлайн-тест «Физика сердечно-сосудистой системы» - ссылка <https://www.sibert-a.ru/moi-raboty-physics>