

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

студента 4 курса 451 группы

направления 03.03.02 «Физика» (профиль Медицинская физика)

факультета нано- и биомедицинских технологий

Алеева Михаила Дмитриевича

Научные руководители

Зав.кафедрой, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Ан.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

М.Ю. Калинин

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2020

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, вопрос о физической нагрузке на организм стоит довольно остро. Особенно в сфере спорта. Это касается не только профессиональных атлетов, но и простых людей. Ведь в наше время многие хотят быть здоровыми, сильными и подтянутыми. Но к сожалению, не всегда физические нагрузки рассматривают в положительном ключе. Порой нам приходится слышать новости о смерти людей, из-за того что их организм, и зачастую именно сердечно-сосудистая система, не справился с нагрузками.

В настоящий момент для чёткого понимания работы сердечно-сосудистой системы при физических нагрузках, применяют ряд методов. Это суточный мониторинг и диагностику: во время проведения нагрузочных проб и в условиях тренировочных процессах. Увы, не у всех есть возможность провести подобную диагностику и соответственно получить результат. Тем более на это нужно много времени.

Важным решением стало создание математической модели поведения сердечно-сосудистой системы при нагрузках на организм. Анализ работы ССС при различных нагрузках, позволит определить оптимальную норму нагрузок и тренировок, прогнозировать результаты и выявить возможные риски во время тренировок и перенапряжения.

**Цель работы:** исследование и последующее моделирование, влияния физических нагрузок на пульсацию кровотока и сердечно-сосудистую систему в целом.

### **Задачи:**

1. Провести критический анализ литературы, посвященной сердечно-сосудистой системы и в частности пульсаций кровотока при физической нагрузке.
2. Выполнить компьютерное моделирование пульсаций кровотока при физической нагрузке.
3. Провести экспериментальное исследование реакции ЧСС на физическую нагрузку.

Теоретическая база исследований сформирована публикациями, которые посвящены темам исследования сердечно-сосудистой системы и её реакции на физические нагрузки.

Структура и объем работы: по своей структуре работа состоит из введения, 5-и глав в теоретической части, 2-х глав в практической части, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 40-ка страницах машинописного текста, содержит 13 рисунков и список литературы из 20 наименований.

### **Основное содержание работы**

*Во введении* обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формируется цель исследования и определяется научная новизна.

*В теоретической части* рассматривается сердечно-сосудистая система, влияние на неё физических нагрузок и модель управления реакции чсс.

*В первой главе* рассматриваются основные понятия сердечно-сосудистой системы.

Сердечно-сосудистая система (ССС) – это важная часть организма, которая наделена многофункциональной структурой. В её строении есть органы, которые имеют большое значение для жизни. Среди них есть сердце и кровеносные сосуды – капилляры, артерии, вены. Они осуществляют транспортировку крови в организме.

Кровообращение человека — замкнутый сосудистый путь, обеспечивающий постоянный ток крови, несущий клеткам кислород и питание, продукты метаболизма и уносящий углекислый газ. Состоит из двух последовательно соединённых кругов (петель), начинающихся желудочками сердца и впадающих в предсердия.

*Во второй главе* рассматривается влияние физических нагрузок на сердце.

Как показали исследования, в которых сравниваются разные варианты сочетания гипертрофии и дилатации сердца с помощью механокардиографии, оптимально увеличение массы миокарда за счет умеренного равномерного

изменения стенки и полости левого желудочка. При этом достигаются наивысшие функциональные возможности ССС: повышение сократительной способности миокарда, эластических свойств магистральных сосудов, снижение ригидности аортально-компрессионной камеры, более низкие величины среднего АД, большая степень соответствия МОК периферическому сопротивлению. Все это позволяет сердцу при физических нагрузках работать в наиболее эффективном режиме. Оптимальный вариант адаптации сердца к спортивным нагрузкам выражается в умеренной брадикардии и гипотонии в покое, инотропном варианте реакции на физическую нагрузку. Это обеспечивается умеренным преобладанием парасимпатических влияний над симпатическими.

*В третьей главе* рассматривается динамическая и статическая нагрузка и её влияние.

При динамической нагрузке вместе с быстрым увеличением энергетических требований быстро улучшаются приспособленческие реакции ССС, направленные на возмещение возросших потребностей мышц в кислороде и различных питательных веществах. Возникает удаление продуктов метаболизма ( $\text{CO}_2$ , молочная кислота) из мышц. Так же усиливается теплоотдача. Динамические нагрузки небольших и средних мощностей в отличие от статических нагрузок, способствуют улучшенному развитию центральной нервной системы и системы кислородообеспечения.

При статической нагрузке систолического артериального давления (САД) оказывается значительно больше, нежели при динамической нагрузке. Для диастолического давления (ДАД) при статической нагрузке характерна прессорная реакция, тогда как для динамической нагрузки депрессорная. Было принято, что как статические, так и динамические физические упражнения активируют нервные волокна скелетных мышц, в следствии чего возникает симпатическая реакция и свойственные ей прессорный эффект и тахекардия. Величина ответа ССС соответствует массе работающих мышц и интенсивности нагрузки. Статическая нагрузка, повышая ДАД вызывает большее напряжение в

работе сердца, чем динамическая нагрузка такой же мощности. Этому способствует и повышающееся внутригрудное давление. В реальной жизни статическая нагрузка может быть серьёзным фактором риска для людей с пограничной гипертонией и других заболеваний ССС. При ней АД может увеличиться намного больше, чем при динамической нагрузке.

В четвёртой главе рассматривается распределение кровотока при мышечной нагрузке.

Мышцы - единственная ткань организма, где в столь высокой степени усиливается кровоток при нагрузке. Другими словами, рабочая гиперемия в них проявляется в наибольшей степени.

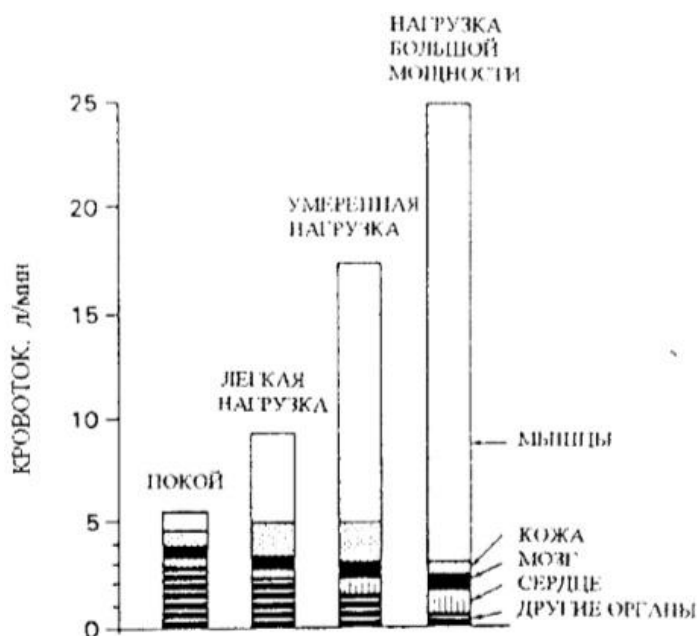


Рис.1 Перераспределение кровотока при увеличении мощности нагрузки у мужчин. Нагрузка большей мощности сопровождается почти 20-кратным увеличением кровотока в скелетных мышцах; 4-кратным увеличением коронарного кровотока, небольшим изменением мозгового кровотока и значительным снижением кровотока в остальных тканях.

Усиление кровотока в работающих мышцах достигается за счет повышения и перераспределения сердечного выброса в итоге вместо 15-20 % МОК, которые поступают к мышцам и условиях покоя, при максимальной нагрузке к ним поступает 80-90 % МОК. В целом при такой нагрузке происходит 15-20- кратное усиление кровотока в скелетных мышцах (рис. 1). Мышцы - единственная ткань организма, где в столь высокой степени

усиливается кроваток при нагрузке. Другими словами, рабочая гиперемия в них проявляется в наибольшей степени.

В пятой главе рассматривается нелинейное моделирование и управление реакцией частоты сердечных сокращений человека во время упражнений с различной интенсивностью нагрузки на беговой дорожке.

Моделирования заключалось в разработке и идентификации нелинейной модели пространства состояний, которая описывает реакцию ЧСС на тренировку во время и после упражнения на беговой дорожке. Входом в модель является интенсивность упражнения, в частности, скорость беговой дорожки.

Результатом модели является ЧСС тренирующегося. Параметры модели были определены по шаговым реакциям ЧСС различных тренирующихся. Отличительной особенностью такого подхода к идентификации параметров было то, что подход был сформулирован как задача оценки параметров динамических систем с несколькими входами и несколькими выходами. В частности, набор параметров модели был оценен путем одновременного использования всех реакций ЧСС разных тренирующихся лиц на различные входные данные шага.

**В практической части изложены:** результаты моделирования и описание проведения эксперимента.

Моделирование проводилось в системе Scilab. Для этого мы взяли нелинейную модель

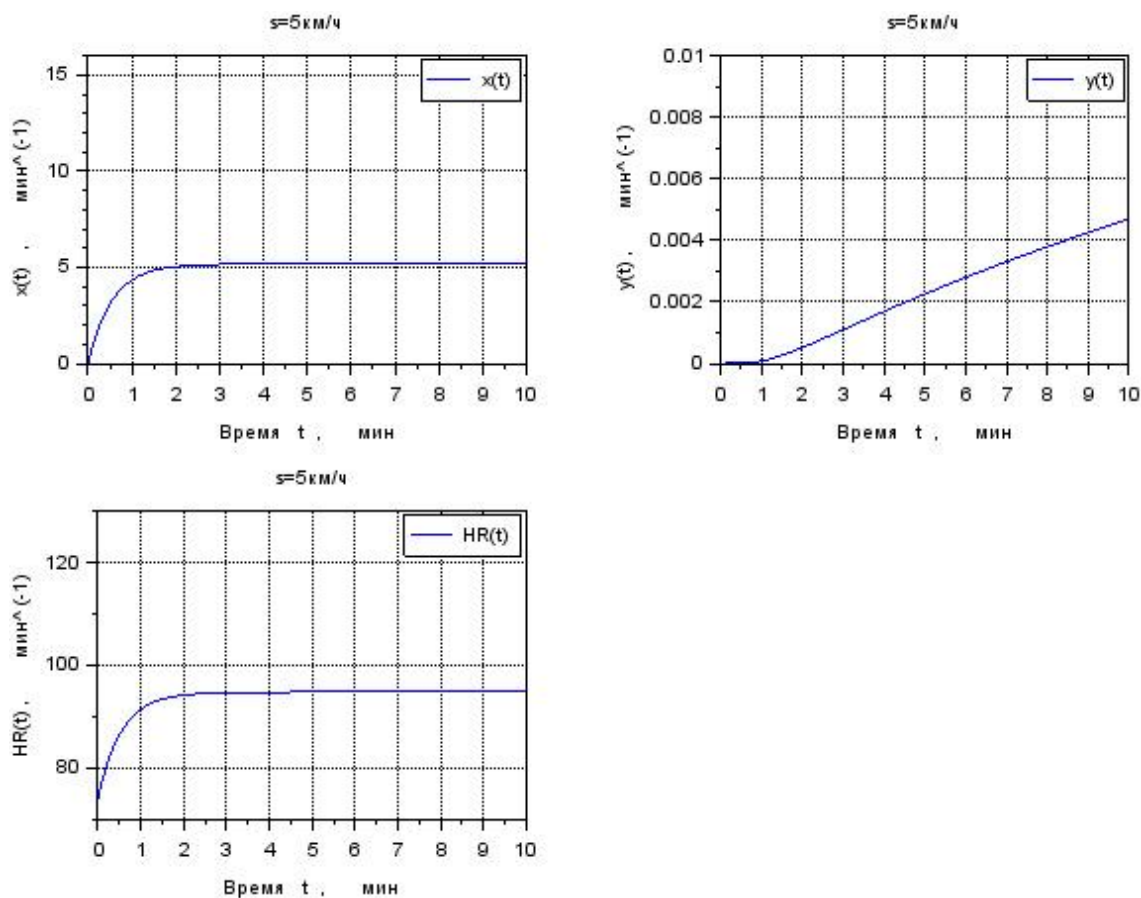
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -1.84x + 24.32y + 0.38 * s^2 \\ \frac{dy}{dt} = -0.0636y + fi \end{cases}$$
$$HR = 4x + HR_{rest}$$
$$fi = 0.00321x / (1 + \exp(-(x - 8.32)))$$

HR – ЧСС

rest – это среднее значение ЧСС в покое тех испытуемых, которое равно 74 уд/мин,  $dx/d(t)$  и  $dy/d(t)$  – начальные условия,  $s(t)$  - скорость беговой дорожки в км/ч, время  $t$  - в минутах.

На рисунке приведены результаты моделирования нелинейной системы при скорости движения беговой дорожки  $s=5$  км/ч.

На нижнем графике продемонстрирована ЧСС



**Экспериментальное исследование реакции ЧСС на физическую нагрузку.**

Для изучения реакции организма на физическую нагрузку разной интенсивности в данном исследовании был использован такой гемодинамический параметр, как частота сердечных сокращений. Это связано с тем, что ЧСС является одной из важнейших характеристик функции миокарда. ЧСС всегда реагирует на физическую нагрузку и на другие изменения в сердечно-сосудистом цикле, что позволяет выявлять тахи- и брадикардии различного происхождения, уточнять диагностику стенокардии, миокардитов, эндокардитов и большинство других нарушений в сердце.

Также не маловажным фактором является доступность величины для непосредственного измерения, что позволяет получать информацию о реакциях сердечно-сосудистой системы даже без специального оборудования.

Нормальные значения для этого параметра располагаются в интервале от 60 уд/мин – 90 уд/мин.

Таким образом, было принято решение исследовать изменение ЧСС в разных стадиях физической активности. Поскольку для оценки состояния сердечно-сосудистой системы может оказаться недостаточно результатов эксперимента под нагрузкой, было решено включить в эксперимент также и результаты восстановления ЧСС.

С целью оценки влияния нагрузочной пробы на частоту сердечных сокращений были выделены несколько стадий эксперимента:

1) Производилось измерение ЧСС в положении стоя в состоянии покоя каждые 10 секунд на протяжении 60 секунд. Это помогает отследить нарушения в работе сердечно-сосудистой системы даже без использования нагрузки.

2) Испытуемого просили присесть на глубину около 10 см на протяжении 2 минут и 20 секунд, в которые каждые 10 секунд производились приседания, а следующие 10 секунд – измерение пульса. Небольшая глубина приседаний соответствует легкой нагрузке на организм.

3) На этом этапе глубина приседаний увеличивается на 5 см, что соответствует умеренной нагрузке. Измерение пульса и приседаний также производилось на протяжении 2 минут и 20 секунд.

4) Также происходило увеличение амплитуды приседаний на 5 см, что в свою очередь, еще больше увеличило нагрузку.

5) Этот этап соответствует периоду восстановления после физической активности. В этот период испытуемый измерял ЧСС каждые 10 секунд на протяжении 4 минут и 20 секунд.

Далее все данные были перенесены в среду “Excel”, с помощью которой была отображена динамика частоты сердечных сокращений в разные стадии влияния нагрузочной пробы на сердечно-сосудистую систему.



**Испытуемый №1.** Мужчина средних лет. Регулярно делает зарядку. После анализа данных, полученных в результате исследования первого испытуемого, была построена зависимость частоты сердечных сокращений от стадии нагрузочного тестирования.

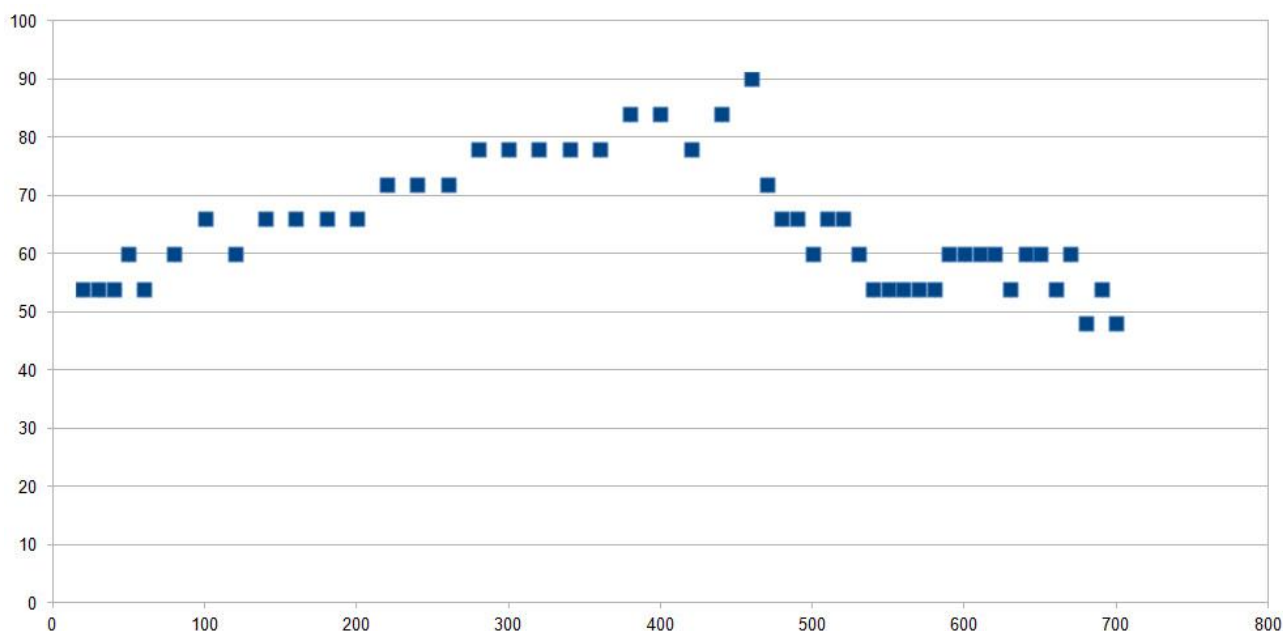


Рисунок 9. Изменение ЧСС для испытуемого №1 на разных стадиях нагрузочной пробы. По вертикальной оси – количество ударов в минуту, по горизонтальной – время в секундах.

Данные, полученные в результате тестирования испытуемого №1 были занесены в таблицу 1, для последующей оценки.

Таблица 1. Средние значения ЧСС на разных стадиях эксперимента.

	Состояние покоя	1 этап (слабая нагрузка)	2 этап (умеренная нагрузка)	3 этап (высокая нагрузка)	Этап восстановления
ЧСС, уд/мин	54±2	64 ±3	73±2	80±2	59±4

Из таблицы видна следующая закономерность: с ростом физической нагрузки частота сердечных сокращений возрастает с 54 уд/мин в состоянии

покоя до 80 уд/мин, а затем, за период восстановления, снижается до 59, что практически соответствует значению пульса в состоянии покоя. В следствии эксперимента было выявлено, что испытуемый №1 начал испытывать небольшую усталость к 3 этапу.

**Испытуемый №2.** Молодой человек. Не спортсмен. Ниже приведены результаты нагрузочного тестирования для второго испытуемого.

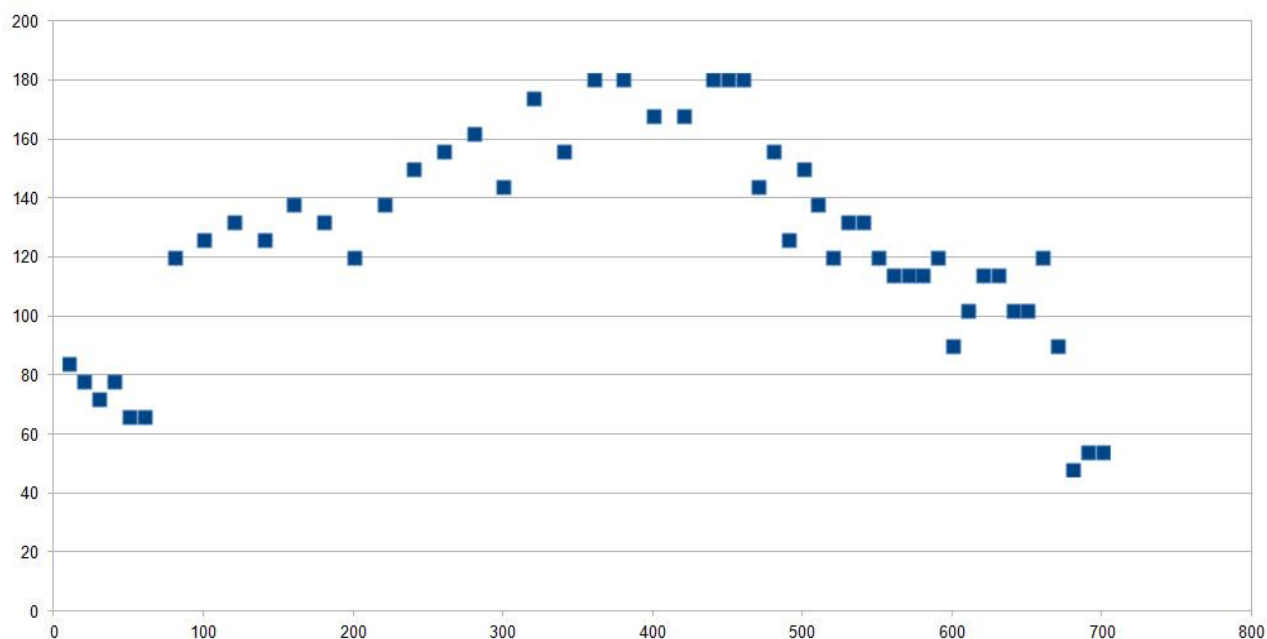


Рисунок 10. Изменение ЧСС для испытуемого №2 на разных стадиях нагрузочной пробы. По вертикальной оси – количество ударов в минуту, по горизонтальной – время в секундах.

Результаты нагрузочного тестирования занесены в таблицу №2, для дальнейшей оценки реакции сердечно-сосудистой системы на разные этапы нагрузки.

Таблица 2. Средние значения ЧСС на разных стадиях эксперимента.

Состояние покоя	1 этап (слабая нагрузка)	2 этап (умеренная нагрузка)	3 этап (высокая нагрузка)	Этап восстановления

ЧСС, уд/мин	74±2	127 ±3	151±2	167±4	120±2
----------------	------	--------	-------	-------	-------

У второго испытуемого мы можем наблюдать более выраженное увеличение пульса в ответ на нагрузку, пульс возрастает примерно на 95 ударов в минуту к 3 этапу нагрузки. Это говорит об острой реакции организма на 3х ступенчатую нагрузку. Также можно заметить, что восстановление происходит медленнее, чем у первого испытуемого. Эксперимент показал что испытуемый №2 начал ощущать усталость на втором этапе, а отдышка появилась уже на первом.

**Испытуемый №3.** Женщина средних лет. Не спортсменка. Реакция сердечно-сосудистой системы третьего испытуемого представлена на рисунке 4.

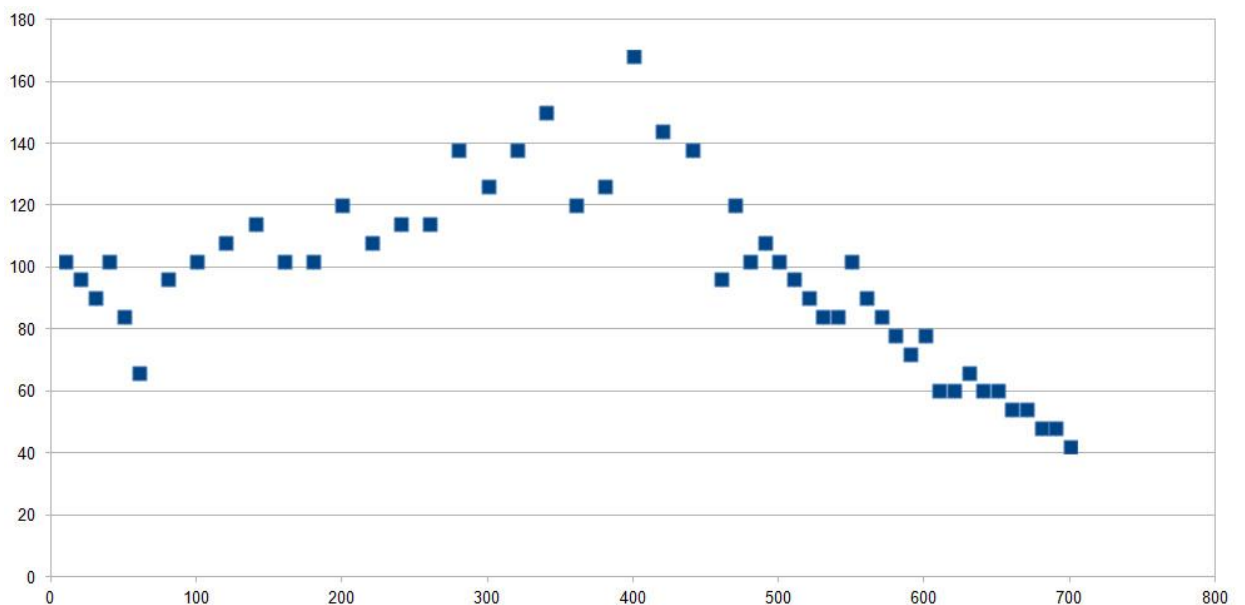


Рисунок 11. Изменение ЧСС для испытуемого №3 на разных стадиях нагрузочной пробы. По вертикальной оси – количество ударов в минуту, по горизонтальной – время в секундах.

Таблица 3. Средние значения ЧСС на разных стадиях эксперимента.

	Состояние покоя	1 этап (слабая нагрузка)	2 этап (умеренная нагрузка)	3 этап (высокая нагрузка)	Этап восстановл ения
ЧСС, уд/мин	90±1	106 ±3	118±5	141±4	84±6

По результатам эксперимента третьего испытуемого, мы можем заметить, что пульс постепенно увеличивается вплоть до 3 этапа. На 3 этапе пульс по сравнению с предыдущими этапами, значительно увеличивается. Почти на 30 уд/мин. А восстановление пульса после нагрузки происходит практически до значения, соответствующего состоянию покоя. За время эксперимента было установлено что испытуемый №3 начал ощущать усталость сопровождаемая одышкой, только к третьему этапу.

**Испытуемый №4.** Школьница средних классов. Не спортсменка. Зависимость частоты сердечных сокращений 4 испытуемого от стадии нагрузочного тестирования.

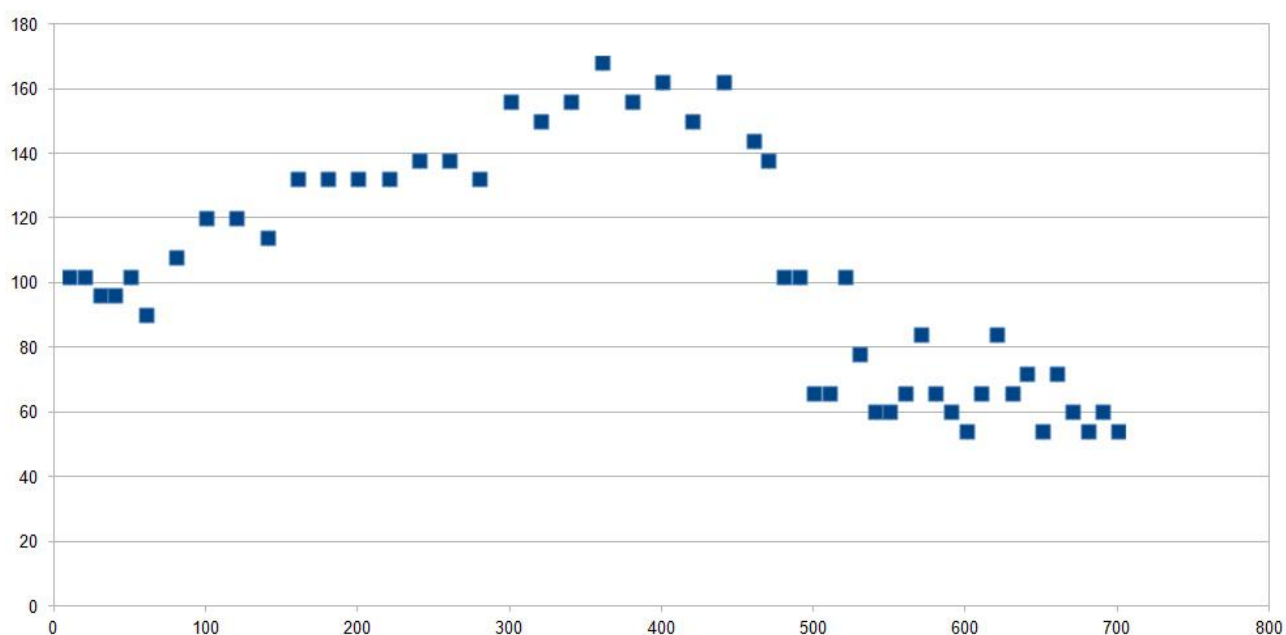


Рисунок 12. Изменение ЧСС для испытуемого №4 на разных стадиях нагрузочной пробы. По вертикальной оси – количество ударов в минуту, по горизонтальной – время в секундах.

Таблица 4. Средние значения ЧСС на разных стадиях эксперимента.

	Состояние покоя	1 этап (слабая нагрузка)	2 этап (умеренная нагрузка)	3 этап (высокая нагрузка)	Этап восстановл ения
ЧСС, уд/мин	98±2	122 ±4	135±3	157±6	78±7

У испытуемого №4 заметна острая реакция сердечно-сосудистой системы на разные этапы нагрузки. Также на графике видно что значение ЧСС резко падает после прекращения физических нагрузок. После чего происходит восстановление пульса. Во время проведения эксперимента была выявлена одышка на втором этапе и сильная усталость на третьем этапе.

**Испытуемый №5.** Мужчина средних лет. Занимается физическими упражнениями. Исследование реакции пульса на нагрузочную пробу у пятого испытуемого.

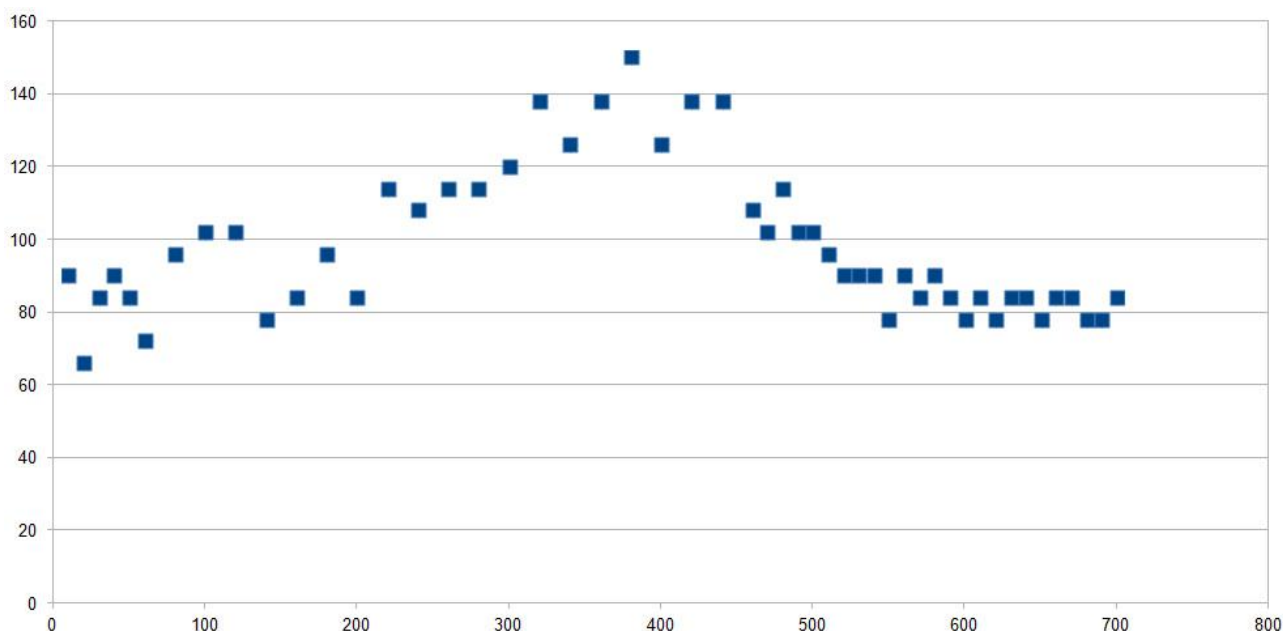


Рисунок 13. Изменение ЧСС для испытуемого №5 на разных стадиях нагрузочной пробы. По вертикальной оси – количество ударов в минуту, по горизонтальной – время в секундах.

Таблица 5. Средние значения ЧСС на разных стадиях эксперимента.

	Состояние покоя	1 этап (слабая нагрузка)	2 этап (умеренная нагрузка)	3 этап (высокая нагрузка)	Этап восстановл ения
ЧСС, уд/мин	81±2	92 ±3	112±5	134±5	90±7

Из таблицы 5 видно, что у испытуемого №5 реакция на нагрузочную пробу имеет не столь ярко выраженную динамику, как у предыдущих испытуемых. А восстановление пульса после нагрузки происходит немного медленнее. Во время эксперимента испытуемый не почувствовал сильной усталости. Только к третьему этапу у него появилась одышка.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения квалификационной работы проведен критический анализ литературы по биомеханике сердечно-сосудистой системы и влиянию физических нагрузок на организм.

С группой людей проведено нагрузочное тестирование, отличающееся разными этапами нагрузки. Также анализу подвергались результаты пульса до начала тренировочных испытаний. Одним из важнейших результатов эксперимента являлась реакция сердечно-сосудистой системы на окончание нагрузочной пробы, отслеживался период восстановления пульса.

В результате можно отметить, что частота сердечных сокращений является одним из самых показательных параметров сердечно-сосудистой системы, которая сразу реагирует на изменения. Оценка этого параметра для каждого испытуемого, в данной работе, показывает насколько по разному одна и та же нагрузочная проба влияет на результаты разных людей.

Так же было проведено моделирование кровотока в системе Scilab. Результаты моделирования показывают, что предложенная модель может быть полезна при изучении сердечно-сосудистой реакции на физическую нагрузку. Это перспективное направление так как позволяет управлять нагрузкой во время кардио тренировок в перспективе в автоматическом (под контролем компьютера) режиме.