

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

наименование кафедры

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ  
ДОППЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ И ДОППЛЕРОВСКОГО  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ КРОВОТОКА ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕДУРЫ  
ПРЕРЫВИСТОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ КОМПРЕССИИ

**АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИКАФИЦИОННОЙ  
МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 2221 группы

направления 03.04.02 «Физика», профиль «Медицинская физика»

код и наименование направления, наименование профиля

институт физики

наименование факультета, института

Машков Константин Владимирович

фамилия, имя, отчество (именительный падеж)

Научный руководитель

Зав. кафедрой д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

А.Г.С  
подпись, дата  
16.06.23

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Исследование вносит важный вклад в изучение влияния процедуры прерывистой пневматической компрессии на сердечно-сосудистую систему человека с использованием совмещения методов лазерной допплеровской флюметрии и допплеровского ультразвукового измерения кровотока. Результаты работы могут быть использованы для определения наиболее эффективных параметров процедуры прерывистой пневматической компрессии, что может способствовать оптимизации ее применения в клинической практике. Кроме того, результаты данной работы являются основой для дальнейших исследований в области влияния физиотерапевтических процедур на сердечно-сосудистую систему человека.

Прерывистая пневматическая компрессия — это метод, который основывается на использовании аппарата, который оказывает механическое воздействие на определённые участки человека с помощью изменения давления воздуха в специальных манжетах, надеваемые перед данной процедурой. ППК может использоваться для лечения профилактики ряда заболеваний опорно-двигательного аппарата, лимфатических отеках и варикозном расширении вен. Врач назначает индивидуально для каждого пациента режим и время воздействия прерывистой пневматической компрессии. Для контроля воздействия прессотерапии и подбора оптимального режима, необходима объективная оценка влияния ППК на сердечно-сосудистую систему человека. Это очень важно для безопасности и эффективности процедуры.

Исследуемые в данной работе неинвазивные методы для оценки воздействия ППК на гемодинамику в сосудах — лазерная допплеровская флюметрия, с помощью которой можно измерить кровоток в малых сосудах, и допплеровское ультразвуковое измерение, позволяющее измерить скорость кровотока в крупных и мелких сосудах, обретают на сегодняшний день актуальность ввиду недостаточной информации по теме сравнения методов ЛДФ

и УЗ-допплерографии во время процедуры прерывистой пневматическая компрессии.

**Научная новизна** исследования заключается в том, что:

- экспериментальные данные расширяют информацию о гемодинамике в артериальных сосудах и микроциркуляции;
- описаны факторы, влияющие на кровоток в сосудах во время процедуры пневматической компрессии на основе анализа сигнала лазерного допплеровского флюметра кровотока фаланги ноги и допплеровского ультразвукового измерения кровотока в бедренной артерии;
- даны рекомендации по методам измерения кровотока в микроциркуляторном русле, что может помочь выявить паттерны, характерные для заболеваний сердечно-сосудистой системы.

**Объектом исследования** являлась группа из 11 человек возрастом от 23 до 42 лет, без выявленных сосудистых нарушений.

**Предметом исследования** является методика оценки влияния ППК на изменение кровотока в сосудах с помощью ЛДФ и УЗ-допплерографии

**Проблема исследования** заключается в необходимости метода для качественной оценки воздействия процедуры прерывистой пневматической компрессии на гемодинамику сосудов в месте её проведения. Основой организации исследования по проблеме стал сравнительный анализ методов ЛДФ и УЗ-допплерографии, предусматривающий изучение и сравнение реакций на процедуру ППК у людей из разных возрастных групп.

**Степень научной разработанности проблемы.** Исследования о влиянии процедуры прерывистой пневматической компрессии проводились как отечественными авторами (Н. Д. Сорокина, Г. В. Селицкий, О. А. Подгорная и др.), так и зарубежными (P. S. Van Bommelen, J. Weiss-Olmanni, J. J. Ricotta и др.).

Были сделаны неоднократные попытки исследователями описать реакцию организма на ППК (K. T. Delis, H. Partsch, G. Ramaswami и др.). Для оценки эффективности были изучены изменения различных характеристик кровотока,

измеряемых, например, с помощью ЛДФ и УЗ-допплерограмм, дополнительно учитывалось улучшение или ухудшение физического состояния испытуемых.

На данный момент существуют области, где не до конца понятно, какие процессы происходят во время проведения ППК и как именно это влияет на характеристики УЗ-допплерограмм и ЛДФ-грамм. Это связано с тем, что в этом процессе много факторов, которые необходимо учитывать: индивидуальные особенности испытуемых, физиологические и молекулярные реакции и другие. В связи с этим, необходимо обратить внимание на совмещение во времени данных УЗ-допплерограмм и ЛДФ-грамм, что способствует лучшему пониманию процессов во время процедуры ППК.

**Цель исследования** — сравнить два метода измерения кровотока во время процедуры прерывистой пневматической компрессии и выявить между ними закономерность.

**Задачи исследования:**

1. Изучить вопрос воздействия прерывистой пневматической компрессии на сердечно-сосудистую систему человека;
2. Описать методику проведения и измерения во время процедуры прессотерапии;
3. Сравнить результаты измерений кровотока, полученных с помощью лазерной допплеровской флюметрии и допплеровского ультразвукового измерения до, во время и после процедуры ППК.

**Гипотеза** исследования сводится к предположению, что выявленная корреляция между полученными данными во время измерения кровотока с помощью лазерной допплеровской флюметрии и допплеровского ультразвукового измерения, станет основой для подбора эффективных параметров процедуры прерывистой пневматической компрессии, что может способствовать оптимизации ее применения в клинической практике.

**Методы исследования.** Для достижения цели диссертационной работы были использованы различные методы исследования, включая теоретический анализ и обобщение научной литературы по проблеме, а также проведение

сравнительного эксперимента. Для обработки объективных и субъективных данных были применены статистические методы.

**Теоретико-методологической** основой исследования стали научные труды отечественных и зарубежных авторов по исследованию влияния процедуры прерывистой пневматической компрессии. Так же были использованы необходимые справочные материалы по смежным темам по и данные научных журналов.

Методологической основой диссертационного исследования в практическом и теоретическом стали следующие работы:

- по вопросам строения сердечно-сосудистой системы (Е.П. Бурлева, А.А. Фокин, В.Л. Ермолаев, Е.В. Иванов, В.И. Козлов, А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров и др.)
- по вопросам использования ультразвуковой допплерографии и ЛДФ для оценки кровотока человека (А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров, Дж. Вильям, С. Джон, В.П. Куликов, С.В. Лавренко, Е. М. Носенко, Н. С. Носенко, Л. В. Дадова., В. Г Лелюк, С. Э. Лелюк., Е.Ф. Дутикова, Ю.В. Зияева и др.)
- по вопросам влияния процедуры прерывистой пневматической компрессии на гемодинамику кровотока (Н. Д. Сорокина, Г. В. Селицкий, О. А. Подгорная, А. С. Жердева, R. D. Sheldon, B. T. Roseguini, M. H. Laughlin, S. C. Newcomer, S. J. Kavros, K. T. Delis, N. S. Turner, A. E. Voll, D. A. Liedl, T. W. Rooke и др.)
- по вопросам факторов, регулирующих тонус сосудов (Р. З. Бахтияров М. Р. Забиров, Б. А. Намаканов, М. М. Расулов, А. М. Мелькумянц, Т. В. Балахонова, О. А. Погорелова, М. И. Трипотень, Д. К. Гайнуллина, О. О. Кирюхина, О. С. Тарасова, L. E. Chen, K. Liu, W. N. Qi, E. Joneschild, A. V. Seaber, J. R. Urbaniak и др.)

**Этапы исследования и опытно-экспериментальная база.** Исследование было проведено с использованием приборной базы Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

с участием 11 человек в возрасте от 23 до 42 лет. Исследование проводилось в три этапа.

На первом этапе была проведена аналитическая работа, где были изучены научные публикации, определен научный аппарат и проблема исследования. Была сформулирована тема и гипотеза педагогического эксперимента, а также была разработана модель исследования, которая послужила основой для последующей опытно-экспериментальной части научной работы.

На втором этапе проводилось опытно-экспериментальное исследование, в рамках которого были оценены результаты и произведены корректировки в экспериментальном процессе. Были обобщены количественные данные полученных результатов. Проходил анализ научных материалов, посвященных медицине и использованию прессотерапии.

На третьем этапе проводилась обработка результатов, полученных в ходе экспериментальной работы, и их количественный и качественный анализ, а также уточнялись теоретические положения, были сформулированы выводы по проведённому исследованию.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в расширении понимания факторов, влияющих на гемодинамику в артериальных сосудах и микроциркуляцию во время процедуры ППК. Исследование также обосновывает применение методов ЛДФ и УЗ-допплерографии для оценки кровотока. Полученные результаты могут являться теоретической основой знаний о проблемах измерения и оценки влияния прерывистой пневматической компрессии на организм человека.

**Практическая значимость** исследования заключается в том, что позволило установить закономерность изменений параметров кровотока, которые были замерены с помощью методов ЛДФ и УЗ-допплерографии, что в свою очередь может способствовать улучшению применения ППК в клинической практике.

**Достоверность и научная обоснованность** результатов исследования обосновывается применением общепризнанных теоретических и

методологических теорий и использованием современной приборной базы. Кроме того, сочетание математической статистики с качественным анализом и интерпретацией полученных данных способствует повышению достоверности полученных результатов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были представлены:

- научная конференция Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского «Студенческая научная конференция СГУ» (Саратов, 2022 г.);
- XXVI международная конференция «Saratov Fall Meeting 2022» (Саратов, 2022 г.);
- всероссийская школа-семинар «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов, 2022 г.);

Личное участие автора отмечено на всех этапах диссертационного исследования, включая анализ научных работ по проблеме исследования, обоснование его актуальности, определение целей и задач, выбор научно-методологических подходов, освоение, апробацию и применение необходимых методов исследования, планирование и организация экспериментальной части работы, а также подготовка материалов для публикаций в научных статьях, формулирование выводов, теоретических положений и написание работы.

**Положение, выносимое на защиту:**

1. Установлена корреляция увеличения перфузии микроциркуляторного русла и снижения резистентности артериальных сосудов при проведении процедуры прерывистой пневматической компрессии.

Структура магистерской диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы (45 источников), включает 29 рисунков, 3 таблицы. Основной текст работы представлен на 59 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу литературных источников, касающихся кровообращения нижних конечностей человека, а также методов исследования влияния на гемодинамику кровотока.

Рассмотрена схема кровообращения нижних конечностей. В коллатеральном кровообращении нижних конечностей ключевую роль играют внутренняя подвздошная артерия и глубокая артерия, которые имеют многочисленные связи между собой. Глубокая артерия бедра формирует сеть коленного сустава и создает анастомозы с ветвями подколенной артерии с помощью своих ветвей.

Капилляры – это самые тонкие и многочисленные сосуды диаметром 7-8 микрон, расположенные в органах и тесно связанные с их тканевыми компонентами. Эритроциты, расположенные в капиллярах, подвергаются пластической деформации, что способствует улучшению обогащения клеток кислородом.

Метод исследования микроциркуляции, основанный на лазерной допплеровской флюметрии, позволяет проанализировать изменения кровотока в микроциркуляторном русле.

Использование ультразвуковых волн позволяет исследовать сердечно-сосудистую систему. Высокочастотные ультразвуковые датчики (7-12 МГц) подходят для изучения поверхностно расположенных объектов, таких как щитовидная железа или кровеносные сосуды, в то время как низкочастотные датчики (3,5-5 МГц) используют для изучения объектов, расположенных глубоко в теле.

Допплеровские методы – это группа методов визуализации, используемых при ультразвуковых исследованиях, которые позволяют получать информацию о движении кровотока, включая направление и скорость. Когда ультразвуковые

волны отражаются от объектов, их частота меняется в зависимости от скорости объекта, угла между скоростью объекта и ультразвуковым лучом, скорости звука в среде и основной частоты излучения. Если источник и детектор ультразвуковых волн остаются неподвижными, частота волны, отраженной движущимся объектом, увеличивается при приближении объекта к датчику и уменьшается при удалении от датчика. Этот эффект применим к элементам крови, таким как эритроциты.

Изучено влияние прессотерапии на гемодинамику кровотока. Этот метод известен как лимфодренажный массаж. Процедура проводится с использованием аппарата, который нагнетает воздух в специальные манжеты, надеваемые на определённые участки тела. Надувание и сдувание воздушных камер в манжетах позволяет создать массажный эффект, улучшающий артериальную и венозную гемодинамику.

**Во второй главе** рассматривается методика и аппаратура для проведения исследования.

В исследовании для получения допплерограммы использовался УЗИ аппарат «Edan U50» (Китай) с линейным датчиком модели L15-7b с частотой 7,2 МГц, в режиме импульсного допплера (PW). Для визуализации артерий использовался режим В, для нахождения артериального кровотока использовался режим цветового кодирования (CD).

Прерывистая пневматическая компрессия проводилась на добровольцах, не имеющих сердечно-сосудистых заболеваний, с использованием профессионального аппарата для проведения процедуры прессотерапии (лимфодренажа) «Doctor Life Mark 400» (Южная Корея).

Показания микроциркуляции измерялись с помощью портативного ЛДФ устройства «ЛАЗМА ПФ» (Россия). В устройстве «ЛАЗМА ПФ» применяется одночастотный лазер мощностью излучения 0,7 мВт и с длиной волны 850 нм, глубина проникновения в кожу которого составляет около 1-1,2 мм.

ЛДФ прибор закреплялся на большой фаланге пальца правой ноги, велась запись данных с прибора в течение 4 минут перед процедурой прессотерапии.

Параллельно делались УЗИ допплерограммы с бедренной артерией. Манжеты аппарата «Mark 400» одевались на ноги человека, каждая из них состоит из шести отдельных внутренних камер для воздуха. Самые нижние камеры на стопах были отключены, чтобы они не влияли на работу ЛДФ устройства. Процедура прессотерапии длилась 30 минут при давлении 200 мм.рт.ст. в режиме «С»: камеры последовательно снизу-вверх надуваются и сдуваются.

Велась непрерывная запись ЛДФ-грамм. Во время проведения ППК фиксировались допплерограммы, соответствующие окклюзии в интервале 5 минут от начала эксперимента (I окклюзия) и за 5 минут до окончания проводимого исследования (предпоследняя окклюзия). По окончании процедуры в течение 4 минут продолжалась запись ЛДФ-грамм, а также делались снимки допплерограмм.

Увеличение интенсивности на допплерограмме соответствует увеличению количества клеток крови, от которых происходит отражение ультразвукового излучения.

Средняя скорость за период сердечного цикла рассчитывалась по формуле:

$$v_{cp} = \frac{\sum \text{Интенсивность пикселя} \cdot \text{Скорость данного пикселя}}{\sum \text{Интенсивность пикселя}}, \quad (1)$$

Объёмный кровоток ( $Q$ ) за период сердечного цикла:

$$Q = S \cdot v_{cp}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сосуда,  $\text{см}^2$ ;

$v_{cp}$  – усреднённая скорость кровотока,  $\text{см}/\text{с}$ .

Был введён безразмерный коэффициент резистентности сосудов:

$$R = \frac{v_{max_B}}{v_{max_A}}, \quad (3)$$

где  $v_{max_B}$  – максимальная скорость обратного кровотока,  $\text{см}/\text{с}$ ;

$v_{max_A}$  – максимальная скорость прямого кровотока,  $\text{см}/\text{с}$ .

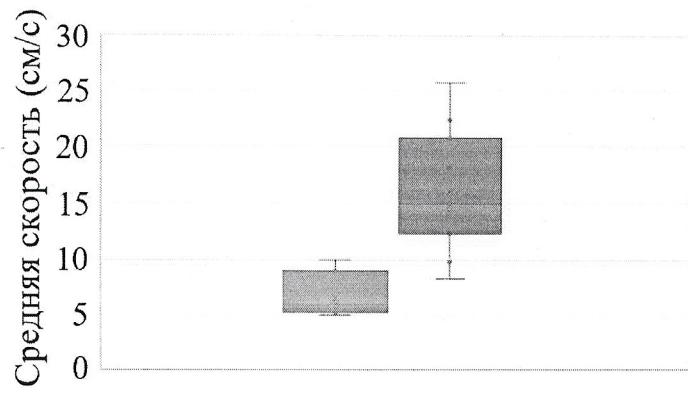
В третьей главе рассмотрены результаты по группе испытуемых. Для одного из испытуемых средняя скорость прямого кровотока по данным УЗ-допплерограмм значительно увеличилась после ППК по сравнению с обратным кровотоком. Объемный кровоток увеличился аналогичным образом. Значение безразмерного коэффициента сосудистого сопротивления заметно снизилось после прессотерапии, что свидетельствует о снижении местного сосудистого сопротивления (табл.1).

Таблица 1 – Значения средней скорости, величины объёмного кровотока и резистентности сосудов до и после ППК

Параметр	До прессотерапии	После прессотерапии
Средняя скорость прямого/обратного кровотока (см/с)	6.2 / -6.2	25.8 / -7.9
Величина прямого/обратного объёмного кровотока (мл/мин)	197.5 / -195.6	821.4 / -249.7
Резистентность сосудов	0.88	0.39

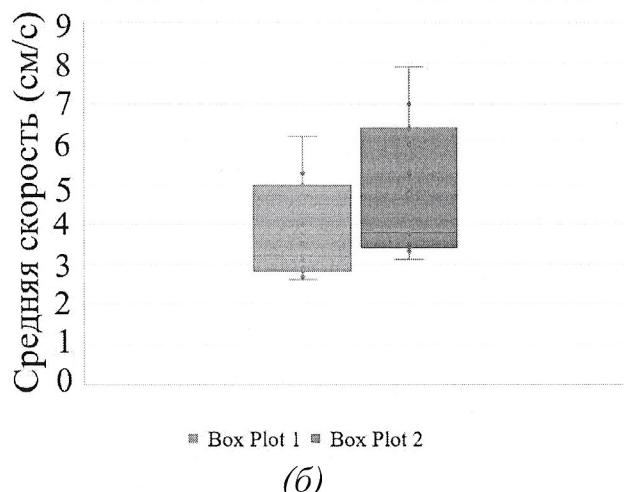
Значение перфузии для данного испытуемого по данным ЛДФ-грамм увеличилось более чем в два раза с диапазона от 20-30 пф.единиц до 40-80 пф.единиц.

На рисунке 1 приведены диаграммы разброса средней скорости кровотока за период сердечного цикла до и после прессотерапии для группы испытуемых. На рисунке 2 приведены диаграммы величины перфузии микроциркуляторного русла и резистентности артериальных сосудов до и после прессотерапии.



■ Box Plot 1 ■ Box Plot 2

(a)



■ Box Plot 1 ■ Box Plot 2

(б)

Рис. 1 – Разброс средней скорости кровотока за период сердечного цикла до (Box Plot 1) и после (Box plot 2) прессотерапии: а – прямого кровотока, б – обратного кровотока

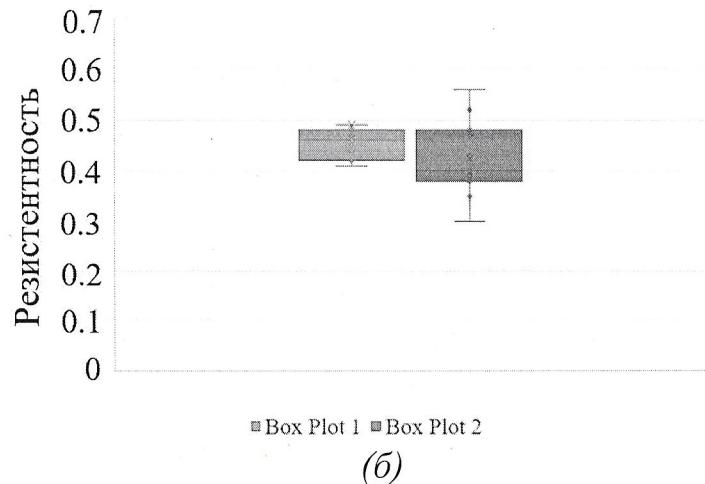
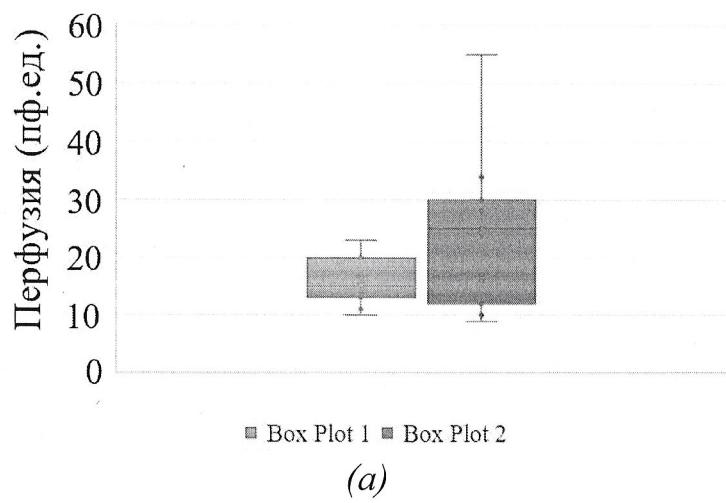


Рис. 2 – Разброс величины перфузии микроциркуляторного русла (а) и резистентности артериальных сосудов (б) до (Box plot 1) и после (Box plot 2) прессотерапии

На рисунке 3 приведён график изменения перфузии микроциркуляторного русла и резистентности артериальных сосудов для всех испытуемых на основе показаний ЛДФ-грамм и УЗ допплерограмм до и после процедуры прессотерапии.

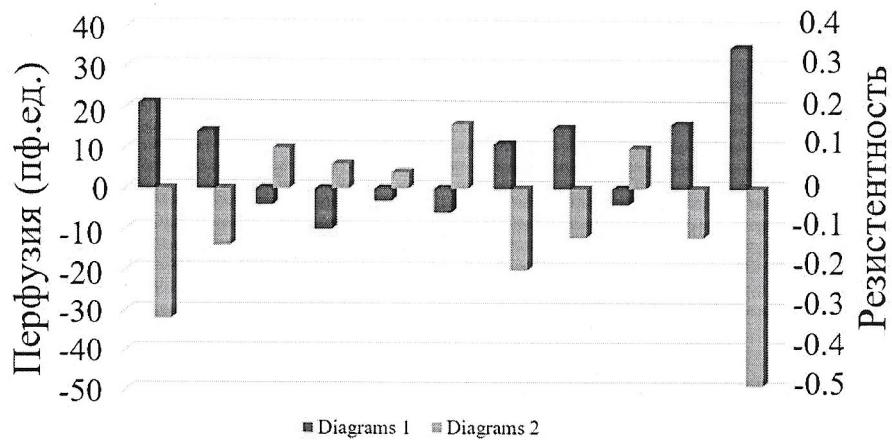


Рис. 3 – Diagrams 1 – разность между показаниями средней перфузии до и после процедуры прессотерапии для каждого испытуемого по данным ЛДФ-грамм. Diagrams 2 – разность между показаниями резистентности до и после процедуры прессотерапии для каждого испытуемого по данным ультразвуковых допплерограмм

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

Результаты измерений динамики сосудистого тонуса периферической системы ноги соответствовали динамике изменения резистентности артериального русла. При этом при увеличении перфузии микроциркуляторного русла наблюдалось снижение резистентности артериальных сосудов.

Как следует из проведенных измерений, ЛДФ-грамма позволяет достаточно хорошо охарактеризовать изменение характера кровотока в микроциркуляторном русле. Однако для оценки изменения тонуса и резистентности сосудистой системы требуется продолжительный временной участок ЛДФ-записи. Для непрерывной оценки характера кровотока в микроциркуляторном русле (за период одного кардиоцикла) предпочтительным оказывается использование УЗИ-допплерограмм, по изменению параметров которых также можно оценить изменения тонуса и резистентности сосудистой системы.

**Список публикаций автора, по теме диссертации:**

1. **Mashkov K. V. et al.** Comparative Analysis of Methods of Laser Doppler Flowmetry and Doppler Ultrasound Measurement of Blood Flow during the Procedure of Intermittent Pneumatic Compression //Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2022. – Т. 8. – №. 4. – С. 040512 (SCOPUS Q2);
2. **К.В. Машков.** Диагностика артериальных сосудов по ультразвуковым допплерограммам при прессотерапии// Научные исследования студентов Саратовского государственного университета: материалы итоговой студенческой научной конференции. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 2022 – 96 с.
3. А.В. Скрипаль, А.Д. Усанов, Р.Г. Чаббаров, **К.В. Машков.** Лазерная допплеровская флюметрия при прессотерапии нижних конечностей // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – 2022. – С. 262-264.

