

СТРУКТУРИРОВАННАЯ ПРОГРАММА УПРАЖНЕНИЙ НА БИОМЕХАНИКУ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ СРЕДИ ПАЦИЕНТОВ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ 2 ТИПА С ПОЛИНЕЙРОПАТИЕЙ И БЕЗ НЕЕ



© A.S. Kumar¹, A. Hazari¹, A.G. Maiya^{1*}, B.A. Shastry², S.K. Nagiri², V. K¹

¹Department of Physiotherapy, School of Allied Health Sciences, Manipal Academy of Higher Education, Manipal, Karnataka, India

²Department of General Medicine, Kasturba Hospital, Manipal, Karnataka, India

ВВЕДЕНИЕ. Биомеханические изменения нижних конечностей у пациентов с сахарным диабетом 2 типа (СД2) часто приводят к различным осложнениям стопы, которые могут еще больше усугубить заболеваемость и смертность, связанные с диабетом. Эти изменения возникают по причине костно-мышечных изменений, таких как снижение силы мышц стопы, упругости мышц нижних конечностей, постуральных изменений и т.д.

ЦЕЛЬ. Разработать и определить эффективность структурированной программы упражнений на кинетику и кинематику нижних конечностей среди пациентов с СД2.

МЕТОДЫ. Было привлечено в общей сложности 35 пациентов с СД2 (с СД2 без нейропатии – 15 и с СД2 с периферической полинейропатией – 20). Все участники были подвергнуты клинической и биохимической проверке, после чего три раза в неделю в течение 12 нед проделывали структурированную программу упражнений, получая при этом стандартную медицинскую помощь.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Средний возраст участников составил $56 \pm 10,5$ (без нейропатии) и $62,3 \pm 7,35$ (с нейропатией) года, средняя продолжительность диабета составила $8,7 \pm 8,95$ (без нейропатии) и $10,97 \pm 8$ (с нейропатией) года, средний индекс массы тела – $26,54 \pm 4,83$ (без нейропатии), $24,39 \pm 3,58$ (с нейропатией). Значительные различия наблюдались в кинетических и кинематических показателях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Настоящее исследование показывает, что протокол структурированных упражнений очень эффективен в улучшении биомеханики стопы у пациентов с СД2 как с нейропатией, так и без нее. Выполнение данных упражнений может корректировать структуру и функцию стопы и в конечном итоге может снизить риск развития диабетических язв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подошвенное давление; НОМА-IR; тренировочное обучение; периферическая нейропатия; диабетическая стопа

STRUCTURED EXERCISE PROGRAM ON FOOT BIOMECHANICS & INSULIN RESISTANCE AMONG PEOPLE LIVING WITH TYPE 2 DIABETES WITH AND WITHOUT PERIPHERAL NEUROPATHY

© Amaravadi S. Kumar¹, Animesh Hazari¹, Arun G. Maiya^{1*}, Barkur A. Shastry², Shivashankara K. Nagiri², V. K¹

¹Department of Physiotherapy, School of Allied Health Sciences, Manipal Academy of Higher Education, Manipal, Karnataka, India

²Department of General Medicine, Kasturba Hospital, Manipal, Karnataka, India

BACKGROUND: The biomechanical changes in foot among people with type 2 diabetes mellitus often leads to various foot complications which could further add to diabetes related morbidity & mortality. These changes could be seen due to musculoskeletal factor like reduction in intrinsic foot muscle strength, tightness of lower limb muscles, postural changes, etc.

AIM: To design and determine the efficacy of a structured exercise program on foot kinetics and kinematics among type 2 participants

MATERIALS AND METHODS: A total of 35 participants with type 2 diabetes (n=15, type 2 diabetes mellitus without neuropathy and n=20, type 2 diabetes with peripheral neuropathy) were recruited. All participants were screened clinically & biochemically and given a set of structured exercise program, three times a week for 12 weeks along with standard medical care.

RESULTS: The mean age of the participants was 56 ± 10.5 (Non neuropathy) 62.3 ± 7.35 (Neuropathy) years, mean duration of diabetes was 8.7 ± 8.95 (Non neuropathy), 10.97 ± 8 (Neuropathy) years, mean Body mass index was 26.54 ± 4.83 (Non neuropathy), 24.39 ± 3.58 (Neuropathy), Significant differences have been observed in kinetic and kinematic variables.



CONCLUSION: The present study shows that the structured exercise protocol is very effective in improving the biomechanics of foot in people with type 2 diabetes with and without neuropathy. It could help to correct the structure and function of the foot and eventually could reduce the risk of foot complications like diabetic foot ulcers.

KEYWORDS: *plantar pressure; HOMA-IR; exercise training; peripheral neuropathy, diabetic foot*

Сахарный диабет (СД) является глобальным эпидемиологическим метаболическим расстройством, характеризующимся значительной заболеваемостью и смертностью [1]. Распространенность СД 2-го типа (СД2) резко возросла, особенно в Индии [1]. Если учесть, что 78,3 млн пациентов с диабетом живут в Юго-Восточной Азии, Индия стала настоящей восточной столицей диабета. Ожидается, что к 2040 г. заболеваемость СД возрастет до 131 млн человек [2]. За последние 30 лет статус диабета изменился: ранее данное заболевание недооценивалось и воспринималось как умеренное расстройство пожилых людей, тогда как на данный момент оно является одной из основных причин заболеваемости и смертности среди молодых людей и людей среднего возраста. При СД2 наблюдается повышение глюкозы циркулирующей крови, вызванное нарушением толерантности к глюкозе вследствие развития резистентности к инсулину (ИР). Также сообщается о нарушениях кинетики и кинематики стопы среди пациентов с СД2 [3], которые в дальнейшем приводят к различным осложнениям со стороны стопы и могут значительно повысить заболеваемость, смертность, а также утяжелить социальное и экономическое бремя, связанное с этим заболеванием [4].

Кинетические параметры, такие как увеличение подошвенного давления, считаются наиболее важными этиологическими факторами, вызывающими диабетические язвы стопы [5]. Исследования показали значительно более высокое подошвенное давление среди пациентов с СД2 как с периферической нейропатией, так и без нее по сравнению со здоровыми людьми [3, 6]. Также доказано, что кинематические параметры, такие как скорость ходьбы, скорость движения сустава, объем движения, сила сустава и пространственно-временная характеристика походки, также значительно изменяются под воздействием заболевания [6]. Эти изменения можно рассматривать как следствие воздействия костно-мышечных факторов (снижение силы мышц стопы, упругости мышц нижних конечностей, постуральных изменений и т.д.). В исследовании сделан вывод о значительном снижении силы мышц нижних конечностей у пациентов с СД2 с нейропатией и без нее. Данные нарушения связаны с измененными кинетикой и кинематикой, приводящими, в конечном итоге, к нарушению подвижности и ухудшению качества жизни [7]. При этом снижение проксимальной силы мышц чаще возникает при диабетической нейропатии [7]. Исследование показало, что у пациентов с диабетической периферической нейропатией наблюдаются снижение мышечной силы, качества мышечной ткани и замедленное сокращение, указывающее на функциональные нарушения [8]. В настоящее время наиболее значимым проявлением моторной нейропатии у пациентов с СД является ишемический инфаркт мышц бедра, включая латеральную широкую мышцу бедра, приводящую мышцу бедра, а также двуглавую мышцу бедра, что обуславливает снижение мышечной силы [9]. Как было предложено выше, уменьшенный объем движения и ограничение подвижности сустава могут приводить к увеличенному времени

подошвенного давления, что в конечном итоге предрасполагает к развитию осложнения со стороны стопы [10]. Также была установлена взаимосвязь между упругостью икроножных мышц и повышением подошвенного давления среди пациентов с СД2, при этом в качестве патогенетического механизма рассматривался так называемый «эффект сплит-сайта» [11]. В исследовании также сообщалось об уменьшении пассивного диапазона разгибания голеностопного сустава в состоянии покоя среди пациентов с СД по сравнению со здоровыми людьми. Это может привести к увеличению статического подошвенного давления в подверженных давлению областях [12]. Постуральные изменения со статическим и динамическим дисбалансом также отмечались у пациентов с СД2. Было высказано предположение, что это в большей степени связано с диабетической полинейропатией вследствие сенсорного и моторного дефицитов [13].

Изменения статического и динамического положения стопы могут быть напрямую связаны с измененным распределением подошвенного давления [14]. Из предыдущего исследования видно, что существуют значительные изменения кинетических и кинематических параметров стопы, которые являются биомеханически значимыми. Возможно существование тесного взаимодействия кинетики и кинематики с преобладанием костно-мышечных изменений в коленных и голеностопных суставах. Широко известен тот факт, что физическая нагрузка играет значительную роль в контроле гликемии за счет использования избытка глюкозы при сокращении большой группы мышц. Наибольшей эффективностью обладают комплексы упражнений с преобладанием аэробных и силовых нагрузок для мышц верхних и нижних конечностей. Было доказано, что физическая активность улучшает контроль гликемии, а также положительно влияет на липидный профиль, артериальное давление, сердечно-сосудистую систему и вес [15]. Тем не менее до сих пор не была разработана и введена структурированная программа упражнений для коррекции биомеханики стопы для пациентов с СД2. Таким образом, необходимо разработать и предложить подобный комплекс специальных упражнений для предотвращения костно-мышечных изменений стопы у пациентов с диабетом, что позволит предотвратить развитие осложнений со стороны нижних конечностей.

Таким образом, данное исследование было проведено с целью разработки структурированной программы упражнений на кинетику и кинематику стопы у пациентов с СД2, определения ее эффективности, а также выяснения влияния данной программы упражнений на биомеханику стопы и резистентность к инсулину у пациентов с СД2 с периферической нейропатией и без нее.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Экспериментальное исследование, проведенное в клинике диабетической стопы госпиталя Кастурба (Индия, Манипале, Карнатаке).

Критерии соответствия

Для исследования были отобраны участники с подтвержденным СД2 с нейропатией, возрастной группы 30–75 лет. Пациенты с неврологическим заболеванием в анамнезе, парезами, а также беременные женщины были исключены из исследования.

Место проведения исследования

Исследование проводилось в клинике диабетической стопы госпиталя Кастурба, Манипале, в прибрежной Карнатаке, в Южной Индии.

Длительность исследования

Исследование проводилось с июня 2017 г. по май 2018 г.

Участники

При целевом отборе пациентов были включены 35 участников с СД2 (с СД2 без нейропатии – 15 и с СД2 с периферической нейропатией – 20). После подписания добровольного информированного согласия пациенту предоставлялся протокол исследования, после чего начинался сбор данных. Данные были собраны исходно и на 3-м месяце исследования.

Описание процедуры

Всем участникам был установлен диагноз СД2 по данным биохимической лаборатории госпиталя, согласно стандартным рекомендациям Американской диабетической ассоциации, в основу которых легли определение уровня глюкозы плазмы крови натощак и через 2 ч после углеводной нагрузки (оральный глюкозотолерантный тест с использованием 75 г углеводов) и уровня HbA_{1c}. Наличие периферической нейропатии (сенсорной и моторной) подтверждалось с использованием монофиламента, биотезиометра (определение порога вибрационного давления) и исследования Manual Muscle Testing. Мичиганский опросник прибор для скрининга нейропатии (MNSI) также использовался для каждого участника. Кинетические и кинематические параметры, которые были рассмотрены в данном исследовании, описаны ниже наряду с итоговой оценкой результатов.

Кинетические параметры

Среднее подошвенное давление, пиковое (максимальное) подошвенное давление, давление в передней

и задней части стопы были измерены как статически, так и динамически. Для измерения этих параметров использовалось программное обеспечение Wintrack Medicauteur France, USA. Сила мышц нижних конечностей, таких как сгибатели, разгибатели, отводящие мышцы бедра, четырехглавые мышцы, мышцы задней поверхности бедра, подошвенные сгибатели, голеностопные сгибатели и мышцы стопы (разгибатели большого пальца стопы, червеобразные и межкостные мышцы), измерялась с помощью оценочной системы Manual Muscle Testing.

Кинематические параметры

Амплитуда движения голеностопного и коленного сустава, угловая скорость и угловое ускорение в сагиттальной и фронтальной плоскости измерялись с использованием программного обеспечения SIMI 3D Motion Analysis с использованием 9-мм светоотражающих маркеров. Движение было записано с помощью высокоскоростных камер Basler Gig E. С подробным описанием данной технологии можно ознакомиться в исследовании, опубликованном Hazari и соавт. [5]. Пространственно-временные параметры походки, такие как скорость ходьбы, длина шага, продолжительность двойной поддержки, время шага и т.д., измерялись с помощью программного обеспечения Wintrack для сканирования ног. Постуральная оценка также проводилась с использованием оборудования Wintrack.

Другие биомеханические параметры

Каждый участник проходил обследование на предмет наличия таких постуральных отклонений и деформаций, как молоткообразные и когтеобразные деформации пальцев и изменения свода стопы. Исследование длины трехглавой мышцы голени, четырехглавой мышцы, мышц задней поверхности бедра, а также подвздошно-большеберцовых мышц проводилось в начале исследования и после прохождения курса упражнений.

Виды упражнений

Упражнения назначались в два этапа с разными целями. Сначала выполнялись упражнения для контроля уровня гликемии, как показано в табл. 1 ниже.

Далее был разработан и задан определенный набор упражнений для коррекции кинетики и кинематики суставов нижних конечностей, а также других биомеха-

Таблица 1. Протокол регулярных упражнений для контроля сахарного диабета

Параметры	СД2
Частота	3 дня в неделю – аэробные нагрузки. 2 дня в неделю – силовые нагрузки
Интенсивность	40–85% HRR [Аэробные нагрузки], 60–80% 1 RM [Силовые нагрузки] RPE=11–16
Время	Аэробные: 30–60 минут для каждого пациента. Силовые: 8–12 повторов упражнения, 1–3 подхода
Вид упражнения	Аэробные: быстрая ходьба, бег, велотренажер. Силовые нагрузки: мышечные группы – стопа и сгибатели, четвероглавые мышцы, отводящие мышцы бедра, задние мышцы бедра, двуглавые, трехглавые мышцы и дельтовидные мышцы. Растяжение: упражнение на растяжку – мышцы стопы, ахиллово сухожилие, задние мышцы бедра, задние мышцы голени, сгибатели и разгибатели кисти

Примечания: СД2 – сахарный диабет 2 типа

нических отклонений. Этот протокол упражнений был разработан на основе результатов предыдущих исследований и нашего клинического опыта. В основном упражнения были направлены на нижние конечности и стопы с небольшим вовлечением туловища и верхних конечностей. Каждое упражнение выполнялось дважды в день по следующей схеме: три подхода по десять повторений с 10-секундными паузами. Далее следует детальное описание упражнений.

Голеностопный сустав

Силовой компонент: разгибание и подошвенное сгибание, сгибание пальцев, супинация и пронация голеностопного сустава.

Растяжение: активное растяжение икроножной мышцы, камбаловидной мышцы (тыльное сгибание с удержанием в течение 15 с) и растяжка подошвенных фасций.

Колено

Силовой компонент: разгибание колена против ручного сопротивления и манжеты (1 кг был избран как стандарт для всех участников), сгибание колена против ручного сопротивления и манжеты.

Растяжение: активное растяжение четырехглавой мышцы (3) и самостоятельная мобилизация надколенника.

Бедро

Силовой компонент: активное поднятие выпрямленной ноги в положении лежа на спине для тренировки сгибателей бедра; выпрямление ноги в бок с полным распрямлением колена для тренировки отводящих мышц бедра. Интенсивность упражнений на тазобедренный сустав постепенно усиливалась. В течение 1-го месяца всем участникам было предложено выполнить комплекс упражнений без дополнительного веса. Тогда как через 1 мес вплоть до 3-го месяца исследования упражнения выполнялись с утяжеляющими манжетами весом 0,5 кг, а через 3 месяца вплоть до 6-го месяца исследования – дополнительный вес увеличивался до 1 кг.

Растяжение: растяжение грушевидной мышцы с боковой ротацией.

Мышцы туловища и спины

Все участники также выполняли упражнения по усилению разгибателей спины и туловища. Всех пациентов обучили технике выполнения упражнения «мост» для контроля наклона и ротации таза. Также пациенты

выполняли упражнения для тренировки поперечных мышц живота и укрепления диафрагмы. Постуральные упражнения также преподавались и демонстрировались участникам с любыми отклонениями осанки в области шеи, плеч и туловища.

Силовые упражнения. Как упоминалось выше, силовые упражнения, разработанные для верхних и нижних конечностей, проводились с использованием Theraband. Сгибание двуглавых мышц, плечевое сгибание, приведение и наружная ротация выполнялись с профилактикой развития плечевого капсулита и ограничения диапазона движения.

Наблюдение за качеством выполнения упражнений: при выполнении упражнения за пациентами осуществлялся тщательный контроль в целях гарантии качественного выполнения упражнений. Все упражнения были продемонстрированы специалистами и контролировались физиотерапевтом в течение первых 10 дней. Далее все участники самостоятельно выполняли комплекс упражнений дома в течение как минимум 3 мес. При выполнении домашних упражнений пациент вел дневник физической нагрузки, прогресс отслеживался при помощи телефонной связи.

Этическое заключение

Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом госпиталя Кастурба, Манипалом (IEC 339/2016).

Статистический анализ

Все анализы были выполнены с использованием программы SPSS версии 16. Описательная статистика была выполнена для средних значений и стандартного отклонения наряду с проверкой нормальности. Парный t-тест был выполнен для анализа статистически значимой разницы на начальном этапе и через 3 мес. Для статистической значимости было установлено значение p менее 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Демографические данные и биохимические параметры всех участников представлены в табл. 2 и 3. Табл. 4 и 5 суммируют результаты программы структурированного комплекса упражнений для кинетических параметров. Табл. 6 и 7 представляют результаты программы структурированного комплекса упражнений для кинематических параметров.

Таблица 2. Демографические и биохимические данные участников исследования

Параметр	СД2 без нейропатии (n=15)	СД2 с нейропатией (n=20)
Возраст, лет	56±10,5	62,3±7,35
Индекс массы тела	26,54±4,83	24,39±3,58
Глюкоза натощак, мг/дл	128,6±31,65	168,7±63,71
Постпрандиальная глюкоза, мг/дл	238,7±85,66	246,9±75,05
Порог вибрационного давления, В	13,8±3,19	39,65±10,57
Лодыжечно-плечевой индекс	1±0,15	1,16±0,23
Длительность сахарного диабета, лет	8,7±8,95	10,97±8

Примечания: СД2 – сахарный диабет 2 типа

Таблица 3. Биохимические параметры участников до и после проведения исследования

Параметр	До	После	p	До	После	p
НОМА IR	3,34±2,24	2,95±2,2	0,02	2,7±2,21	2,45±1,38	0,04
Инсулин натощак	18,56±4,59	16,23±4,07	0,01	20,68±5,83	19,63±5,26	0,05
HbA _{1c}	7,02±1,52	6,78±1,11	0,001	7,38±1,29	6,99±1,04	0,002

HbA_{1c} – гликированный гемоглобин, НОМА IR – Homeostatic Model Assessment of Insulin Resistance

Таблица 4. Данные кинетических параметров пациентов с сахарным диабетом 2 типа и диабетической нейропатией до и через 3 месяца после начала исследования

Кинетические параметры	Исходно (среднее±СО)	Через 3 месяца (среднее±СО)	Значение p
Среднее давление, кПа	216,41±74,05	188,66±57,32	0,00
Максимальное давление, кПа	421,31±77,32	305,13±70,30	0,00
Максимальное давление в передней части стопы, кПа	1,80±0,51	1,60±0,45	0,00
Максимальное давление в задней части стопы, кПа	1,40±0,17	1,31±0,05	0,00
Отношение максимального давления передней части стопы к максимальному давлению задней части стопы	1,00±0,34	0,96±0,41	0,08
Максимальная область давления, кПа	104,05±18,81	107,25±17,82	0,02
Максимальное давление в области большого пальца стопы, кПа	224,32±30,95	190,77±31,26	0,00

Таблица 5. Данные кинетических параметров пациентов с сахарным диабетом 2 типа без диабетической нейропатии до и через 3 месяца после начала исследования

Кинетические параметры	Исходно (среднее±СО)	Через 3 месяца (среднее±СО)	Значение p
Среднее давление, кПа	125,53±20,83	119,75±19,78	0,00
Максимальное давление, кПа	260,43±54,29	243,05±49,83	0,00
Максимальное давление в передней части стопы, кПа	0,35±0,23	0,43±0,27	0,01
Максимальное давление в задней части стопы, кПа	0,48±0,28	0,48±0,26	0,82
Отношение максимального давления передней части стопы к максимальному	0,73±0,12	0,67±0,13	0,00
Максимальная область давления, кПа	123,2±22,19	118,87±22,33	0,00
Максимальное давление в области большого пальца стопы, кПа	197,74±11,04	194,18±9,28	0,00

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании основное внимание было уделено преимуществам структурированных упражнений на определенные кинетические и кинематические параметры у пациентов с СД2 с периферической нейропатией и без нее. Так, например, распределение подошвенного давления имеет значительную клиническую значимость при определении нагрузки и прогнозировании язв стопы у пациентов с СД [16]. В настоящем исследовании мы обнаружили, что среднее и максимальное подошвенное давление было выше среди участников с нейропатией по сравнению с участниками без нейропатии (216,41±74,05, 421,31±77,32 кПа и 125,53±20,83, 260,43±54,29 кПа соответственно). Хорошо известно, что более высокое подошвенное давление может привести к повреждению мягких тканей и развитию язвы стопы в течение 2,5 лет [17]. Согласно данным таблиц 4 и 5, можно сделать вывод о значительной эффективности предложенного нами комплекса упражнений, о чем свидетельствует стати-

стически значимое снижение среднего и пикового подошвенного давления через 3 мес исследования как у участников с нейропатией, так и без нее (значение p=0,00). Кроме того, в среднем изменения у участников с нейропатией были выше по сравнению с участниками без нейропатии. Снижение подошвенного давления происходило вследствие положительного эффекта упражнений на силу мышц стопы, а также приводило к растяжению подошвенной фасции и мышц голени. Увеличение силы и длины мышц стопы может приводить к равномерному распределению давления при поддержании нормального свода стопы [18]. Было высказано предположение о том, что у пациентов с СД происходят структурные изменения медиальной продольной арки стопы, приводящие к формированию высокого свода стопы [19]. Из данного исследования можно предположить, что предложенный нами протокол упражнений для мышц стопы и голеностопного сустава был эффективен для поддержания и восстановления структуры свода стопы, тем самым обеспечивая равномерное распределение давления со значительно

Таблица 6. Данные кинематических параметров пациентов с сахарным диабетом 2 типа и диабетической нейропатией до и через 3 месяца после начала исследования

Кинематика	Исходно (среднее±СО)	Через 3 месяца (среднее±СО)	Р
Угол голеностопного сустава в покое, градусы	103,46±2,97	101,55±1,87	0,06
Угол голеностопного сустава в начале контактного периода, градусы	106,69±3,91	104,6±2,31	0,08
Угол голеностопного сустава в опорный период, градусы	102,88±3,88	99,75±3,95	0,04
Угол голеностопного сустава при отрыве ноги, градусы	98,61±3,89	101,48±2,49	0,00
Угол коленного сустава в покое, градусы	168,45±4,25	171,14±3,45	0,09
Угол коленного сустава в начале контактного периода, градусы	165,27±2,89	167,99±2,59	0,59
Угол коленного сустава в опорный период, градусы	156,25±3,17	155,14±3,08	0,26
Угол коленного сустава при отрыве ноги, градусы	149,14±5,21	147,96±4,87	0,42
Пиковая скорость голеностопного сустава, °/сек	258,77±45,51	265,94±34,74	0,13
Пиковое ускорение голеностопного сустава, °/сек ²	1689,21±112,47	1789,14±124,4	0,05
Пиковая скорость коленного сустава, °/сек	198,33±23,47	213,42±22,74	0,09
Пиковое угловое ускорение коленного сустава, °/сек ²	1995,41±214,33	2014,15 ±241,32	0,23

Таблица 7. Данные кинематических параметров пациентов с сахарным диабетом 2 типа без диабетической нейропатии до и через 3 месяца после начала исследования

Кинематика	Исходно (среднее±СО)	Через 3 месяца (среднее±СО)	Значение р
Угол голеностопного сустава в покое, градусы	103,36±1,24	102,21±2,19	1,02
Угол голеностопного сустава в начале контактного периода, градусы	101,27±3,12	101,05±1,24	0,91
Угол голеностопного сустава в опорный период, градусы	98,21±3,14	96,18±3,47	0,13
Угол голеностопного сустава при отрыве ноги, градусы	92,44±1,08	90,23±2,04	0,08
Угол коленного сустава в покое, градусы	172,14±3,99	173,53±2,17	0,26
Угол коленного сустава в начале контактного периода, градусы	169,42±4,18	168,15±3,56	0,87
Угол коленного сустава в опорный период, градусы	175,29±2,37	175,33±2,04	0,25
Угол коленного сустава при отрыве ноги, градусы	167,41±4,07	163,78±3,85	0,06
Пиковая скорость голеностопного сустава, °/сек	168,17±4,78	169,44±5,02	0,47
Пиковое ускорение голеностопного сустава, °/сек	1551,11±124,78	1599,47± 134,08	0,09
Пиковая скорость коленного сустава, °/сек	70,03±9,87	74,29±8,45	0,14
Пиковое угловое ускорение коленного сустава, °/сек	1451,24±213,47	1524,48±219,44	0,05

более низкими показателями среднего и максимально-пикового давления в стопе. Результат также может быть подтвержден значительным снижением давления большого пальца стопы, как видно из таблиц 4 и 5. Результаты исследования также свидетельствуют о том, что снижение давления большого пальца стопы и пикового давления могут снизить риск развития язвенных поражений стопы и других осложнений [20]. Исходя из результатов исследования (см. табл. 4) можно также видеть, что после трехмесячного курса упражнений происходит значительное снижение среднего давления в передней и задней частях стопы. Эти результаты также подтверждают эффективность упражнений в достижении равномерного распределения давления. Следует отметить, что аэробные и силовые нагрузки могут также благоприятно влиять на поддержание компенсации СД и контроль веса. Средние изменения индекса массы тела (ИМТ) для участников с нейропатией и без нее составили 0,56 и 0,24 соответственно. Снижение среднего

и пикового подошвенного давления также может быть опосредовано значительным увеличением площади контактной поверхности среди пациентов с СД2 с нейропатией (см. табл. 4). Тем не менее изменения были незначительными среди участников без нейропатии.

Эффект упражнений на кинематику был аналогичен эффектам со стороны кинетики (табл. 6 и 7). Было обнаружено, что на разных этапах ходьбы наблюдаются значительные изменения в диапазоне разгибания голеностопного сустава (этап покоя, контактный, опорный этап и отрыв стопы). Значительное изменение в статическом диапазоне движения голеностопного сустава наблюдалось у участников с нейропатией (р-значение 0,01), что дополнительно свидетельствует об эффективности растяжения задних мышц голени и усиления мышц разгибателей. Выраженное увеличение диапазона разгибания в области голеностопного сустава на этапе опоры и отрыва стопы при ходьбе может иметь большее клиническое значение. Уменьшенный диапазон разгибания

при отрыве стопы может привести к метатарзальным нарушениям и чрезмерному давлению на большой палец, что предрасполагает к развитию язв [21]. Аналогичные результаты были получены в коленном суставе, при этом наблюдалось значительное увеличение диапазона движения коленного сустава на статическом этапе ходьбы. Уменьшенный диапазон движения коленного сустава при статической фазе может свидетельствовать о плотности подколенного сухожилия и слабости четырехглавой мышцы. В настоящем исследовании усиление разгибателей коленного сустава и растяжение подколенного сухожилия были эффективны для увеличения диапазона движения колена. Из таблицы 6 видно, что наблюдается значительное различие диапазона сгибания колена на опорном этапе и при отрыве стопы среди участников с нейропатией ($p=0,04$ и $p=0,01$ соответственно). Полученные данные свидетельствуют об улучшении эксцентрического контроля над четырехглавой мышцей бедра вследствие лучшей тренированности мышц по сравнению с исходным уровнем, что в конечном счете обеспечивает более физиологический процесс ходьбы. Усиление и растяжение задних мышц бедра могут привести к улучшению соотношения H/Q и более эффективному совместному сокращению агонистов и антагонистических коленных мышц, создающих стабильное динамическое соединение [22].

Кинематика тазобедренного сустава количественно не оценивалась. Однако эффект упражнений был клинически очевидным. Силовые упражнения были рассчитаны на сгибатели бедра, разгибатели и отводящие мышцы. Эти упражнения могут быть полезны для поддержания целостности сустава и профилактики таких диабетических осложнений, как остеоартрит бедра [23]. Упражнения, разработанные для корпуса и спины, были эффективны для поддержания равновесия и коррекции постуральных отклонений как для участников с нейропатией, так и без нейропатии. Эти упражнения также могут быть полезны для лечения боли в спине, обычно наблюдаемой среди пациентов с СД [24]. Упражнения для верхних конечностей также могут быть полезны для поддержания диапазона движения в плечевом суставе и профилактики периартрита [25]. Что касается скорости и ускорения в суставах, результаты исследования свидетельствуют о значительных изменениях в голеностопном и коленном суставах. Однако полученных данных недостаточно, таким образом, следует ожидать проведения дополнительных исследований в этой области. Полученные нами результаты свидетельствуют об увеличении скорости и ускорения в суставе за счет увеличения силы мышц. Поскольку сила сустава обусловлена мышечной силой и скоростью в суставе, можно предположить, что выполнение силовых упражнений может привести к укреплению коленного и голеностопного суставов. Ранее проведенные исследования показали снижение силы суставов среди пациентов с диабетом как с периферической нейропатией, так и без нее [26].

Эффект данного комплекса упражнений также был виден по результатам биохимического исследования крови пациентов. Среднее значение HbA_{1c} снизилось с 7,02 до 6,78 в течение 3 мес, что согласуется с результатами предыдущих исследований. Исследование показало значительное снижение HbA_{1c} в течение пер-

вых 10 нед обучения. Также было доказано, что силовые тренировки в большей степени влияют на уровень HbA_{1c} , чем аэробные [27]. Также было выявлено клинически значимое снижение уровня инсулина натощак. Предыдущее исследование, проведенное в нашем центре, показало, что даже правильное распределение подошвенного давления и коррекция измененной биомеханики стопы может быть важным фактором улучшения подвижности нижних конечностей [3]. Настоящее исследование показало, что среди участников без нейропатии наблюдалось снижение уровня инсулина в среднем на 2,33, а среди участников с нейропатией – на 1,05 через 3 мес после начала исследования. Уменьшение данного параметра для участников с нейропатией было менее значительным, чем у пациентов без нейропатии, что наводит на мысль о возможном влиянии патогенетических механизмов развития диабетической нейропатии на усиление инсулинорезистентности. Эти результаты также подтверждались значительным клиническим снижением уровня индекса инсулинорезистентности НОМА (см. табл. 3). Объясняются полученные результаты улучшением чувствительности к инсулину при подключении регулярных физических нагрузок. Стоит также отметить, что усиление мышц стопы приводит к более физиологичному распределению нагрузки и нормализации таких кинематических параметров, как угол, скорость и ускорение в голеностопном суставе. Положительным эффектом силовых нагрузок, предусмотренных в нашем комплексе упражнений, также является благоприятный эффект на контроль гликемии благодаря улучшению чувствительности к инсулину. В исследовании Kimberley и соавт. 2016 было выявлено значительное улучшение чувствительности к инсулину между 48 и 72 ч после тренировки ($ES -0,702$; $CI -1,392$; $TO -0,012$; $p=0,046$). В настоящем исследовании использовалась комбинация аэробных и силовых нагрузок наряду со специализированными упражнениями на определенные группы мышц. Поэтому трудно предположить, какие из упражнений имеют большее значение для улучшения HbA_{1c} индекса инсулинорезистентности НОМА. Однако в любом случае полученные результаты указывают на более эффективную утилизацию избытка глюкозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что разработанный нами комплекс упражнений эффективен для улучшения кинетических и кинематических параметров стопы у пациентов с СД2 с нейропатией и без нее. Эти упражнения могут использоваться в клинической практике, что могло бы помочь корректировать структуру и функцию стопы и в конечном счете снизить риск язвенных и других осложнений стопы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Участие авторов. Концепция и дизайн: Sampath Kumar, Arun G. Maiya; анализ и интерпретация данных: Sampath Kumar, Arun G. Maiya, Animesh Hazari, B.A. Shastri, K. Shivashankar, K. Vaishali; статистический

анализ: Sampath Kumar, Arun G. Maiya; редактирование: Sampath Kumar, Animesh Hazari. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Благодарности. Мы хотели бы выразить признательность Всемирному фонду диабета: 15-941 за их поддержку. Мы также хотим поблагодарить Центр по исследованию и лечению диабетической стопы (CDFCR) за их поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Kaveeshwar SA, Cornwall J. The current state of diabetes mellitus in India. *Australas Med J.* 2014;7(1):45–48. doi: 10.4066/AMJ.2013.1979
- Tripathy JP, Thakur JS, Jeet G, et al. Prevalence and risk factors of diabetes in a large community-based study in North India: results from a STEPS survey in Punjab, India. *Diabetol Metab Syndr.* 2017;(9):1-8. doi: 10.1186/s13098-017-0207-3
- Hazari A, Maiya AG, Shivashankara KN, et al. Kinetics and kinematics of diabetic foot in type 2 diabetes mellitus with and without peripheral neuropathy: a systematic review and meta-analysis. *Springerplus.* 2016;5(1):1819. doi: 10.1186/s40064-016-3405-9
- Chammas NK, Hill RLR, Edmonds ME. Increased Mortality in Diabetic Foot Ulcer Patients: The Significance of Ulcer Type. *J Diabetes Res.* 2016;2016:2879809. doi: 10.1155/2016/2879809
- Hazari A, Maiya AG, Kn S, et al. 3D Biomechanical Analysis of Foot in diabetes with and without peripheral neuropathy-A pilot study. *Res J Pharm Biol Chem Sci.* 2016;7(3):558-564.
- Fernando M, Crowther R, Lazzarini P, et al. Biomechanical characteristics of peripheral diabetic neuropathy: A systematic review and meta-analysis of findings from the gait cycle, muscle activity and dynamic barefoot plantar pressure. *Clin Biomech.* 2013;28(8):831-845. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2013.08.004
- Ijzerman TH, Schaper NC, Melai T, et al. Lower extremity muscle strength is reduced in people with type 2 diabetes, with and without polyneuropathy, and is associated with impaired mobility and reduced quality of life. *Diabetes Res Clin Pract.* 2011;95(3):345-351. doi: 10.1016/j.diabres.2011.10.026
- Allen MD, Major B, Kimpinski K, et al. Skeletal muscle morphology and contractile function in relation to muscle denervation in diabetic neuropathy. *J Appl Physiol (1985).* 2014;116(5):545-552. doi: 10.1152/jappphysiol.01139.2013
- Chawla J. Stepwise approach to myopathy in systemic disease. *Front Neurol.* 2011;(2):49. doi: 10.3389/fneur.2011.00049
- Zimny S, Schatz H, Pfohl M. The Role of Limited Joint Mobility in Diabetic Patients with an At-Risk Foot. *Diabetes Care.* 2004;27(4):942-946. doi: 10.2337/diacare.27.4.942
- Amis J. The Split Second Effect: The Mechanism of How Equinus Can Damage the Human Foot and Ankle. *Front Surg.* 2016;(3):38. doi: 10.3389/fsurg.2016.00038
- Rao S, Saltzman C, Yack HJ. Ankle ROM and stiffness measured at rest and during gait in individuals with and without diabetic sensory neuropathy. *Gait Posture.* 2006;24(3):295-301. doi: 10.1016/j.gaitpost.2005.10.004
- Jáuregui-renaud K. Postural Balance and Peripheral Neuropathy. In: Souayah N, editor. *Peripheral Neuropathy. A New Insight into the Mechanism, Evaluation and Management of a Complex Disorder.* London: IntechOpen; 2013. p. 125-146. doi: 10.5772/55344
- Said AM, Justine M, Manaf H. Plantar Pressure Distribution among Older Persons with Different Types of Foot and Its Correlation with Functional Reach Distance. *Scientifica (Cairo).* 2016;2016:8564020; doi: 10.1155/2016/8564020.
- Colberg SR, Sigal RJ, Fernhall B, et al. Exercise and Type 2 Diabetes. The American College of Sports Medicine and the American Diabetes Association: joint position statement. *Diabetes Care.* 2010;33(12):e147–e167. doi: 10.2337/dc10-9990
- Deschamps K, Matricali GA, Roosen P, et al. Classification of Forefoot Plantar Pressure Distribution in Persons with Diabetes: A Novel Perspective for the Mechanical Management of Diabetic Foot? *PLoS One.* 2013;8(11):e79924. doi: 10.1371/journal.pone.0079924
- Wu SC, Driver VR, Wrobel JS, Armstrong DG. Foot ulcers in the diabetic patient, prevention and treatment. *Vasc Health Risk Manag.* 2007;3(1):65-76.
- Kim EK, Kim JS. The effects of short foot exercises and arch support insoles on improvement in the medial longitudinal arch and dynamic balance of flexible flatfoot patients. *J Phys Ther Sci.* 2016;28(11):3136–3139. doi: 10.1589/jpts.28.3136
- Sacco ICN, Noguera GC, Bacarin TA, et al. Medial longitudinal arch change in diabetic peripheral neuropathy. *Acta Ortop Bras.* 2009;17(1):13-16. doi: 10.1590/S1413-78522009000100002
- Raspovic A, Landorf KB, Gazarek J, Stark M. Reduction of peak plantar pressure in people with diabetes-related peripheral neuropathy: an evaluation of the DH Pressure Relief Shoe™. *J Foot Ankle Res.* 2012;5(1):25. doi: 10.1186/1757-1146-5-25
- van Schie CHM. A Review of the Biomechanics of the Diabetic Foot. *Int J Low Extrem Wounds.* 2005;4(3):160-170. doi: 10.1177/1534734605280587
- Coombs R, Garbutt G. Developments in the use of the hamstring/quadriceps ratio for the assessment of muscle balance. *J Sports Sci Med.* 2002;1(3):56-62.
- Wyatt LH, Ferrance RJ. The musculoskeletal effects of diabetes mellitus. *J Can Chiropr Assoc.* 2006;50(1):43–50.
- Lamoth CJ, Meijer OG, Daffertshofer A, et al. Effects of chronic low back pain on trunk coordination and back muscle activity during walking: changes in motor control. *Eur Spine J.* 2006;15(1):23-40. doi: 10.1007/s00586-004-0825-y
- Bridgman JF. Periarthritis of the shoulder and diabetes mellitus. *Ann Rheum Dis.* 1972;31(1):69–71. doi: 10.1136/ard.31.1.69
- Abadi L, Salahzadeh Z, Rezaei M, et al. Hip joint torques in type II diabetes with and without neuropathy. *Hong Kong Physiother J.* 2017;37:27-33. doi: 10.1016/j.hkpj.2017.01.004
- Bweir S, Al-jarrah M, Almaly AM, et al. Syndrome Resistance exercise training lowers HbA1c more than aerobic training in adults with type 2 diabetes. *Diabetol Metab Syndr.* 2009;(1):27. doi: 10.1186/1758-5996-1-27

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ [AUTHORS INFO]

***Arun G Maiya**, Dean & Professor; address: Karnataka, India 576104; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7573-0137>; e-mail: arun.maiya.g@gmail.com

Amaravadi Sampath Kumar, PhD; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4744-0180>; e-mail: sampathkpt@gmail.com

Animesh Hazari, PhD; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8057-8803>; e-mail: animeshh8@gmail.com

Barkur A. Shastry, Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7630-5028>; e-mail: shastryba@yahoo.co.in

Shivashankara K Nagiri, Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2466-9457>; e-mail: shi.sha@manipal.edu

Vaishali K, BPT, MPT, PhD, Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4150-5729>; e-mail: vaishali.kh@manipal.edu

ЦИТИРОВАТЬ:

Kumar S.A., Hazari A., Maiya A.G., Shastry B.A., Nagiri S.K., K.V. Структурированная программа упражнений на биомеханику нижних конечностей среди пациентов с сахарным диабетом 2 типа с полинейропатией и без нее // *Сахарный диабет.* — 2019. — Т. 22. — №1. — С. 53-61. doi: 10.14341/DM9804

TO CITE THIS ARTICLE:

Kumar SA, Hazari A, Maiya AG, Shastry BA, Nagiri SK, K V. Structured exercise program on Foot Biomechanics & Insulin Resistance among people living with type 2 diabetes with and without peripheral neuropathy. *Diabetes Mellitus*. 2019;22(1):53-61. doi: 10.14341/DM9804