

DOI: 10.15593/RZhBiomech/2017.4.10
УДК 531/534: [57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА МЕХАНИЗМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХОДЬБЫ ПАЦИЕНТОВ В ПОЗДНИЙ ПЕРИОД РЕАБИЛИТАЦИИ ПОСЛЕ ИНСУЛЬТА

В.А. Бронников^{1,2}, В.Б. Смычѐк³, К.А. Складная^{1,2}, Ю.И. Няшин¹, В.Н. Никитин⁴

¹ Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации, Россия, 614990, Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: skks1008@mail.ru

² Центр комплексной реабилитации инвалидов, Россия, 614094, Пермь, ул. Связистов, 11а, e-mail: skks1008@mail.ru

³ Республиканский научно-практический центр медицинской экспертизы и реабилитации, Республика Беларусь, 223027, Минская обл., Минский р-н, пос. Городище, e-mail: priemnaia.meir@mail.ru

⁴ Кафедра теоретической механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: nikitinvladislav86@gmail.com

Аннотация. В восстановительном периоде инсульта пациент приобретает такой вид стереотипа ходьбы, который связан с работой сохранных двигательных единиц. При попытках пациента восстановить двигательную активность организм мобилизует оставшиеся возможности, минимизирует энергетические затраты и изменяет естественные алгоритмы движений. Упрощение алгоритмов ходьбы связано в основном с тем, что минимизируется разновидность движений и количество вовлекаемых мышц в ходьбу. Так, нормальный стереотип ходьбы, связанный с работой голеностопного, коленного и тазобедренного суставов, сменяется патологическим, который характеризуется работой в основном только тазобедренного сустава. Работа тазобедренного сустава меняется с ротации вокруг оси, перпендикулярной сагиттальной плоскости, на вращение вокруг оси, которая направлена под углом к аксиальной плоскости. Авторы предполагают, что это связано с включением в процесс ходьбы мышц туловища, что обусловлено большими амплитудами перемещения его центра масс. В статье рассмотрено изменение перераспределения реакций опор между здоровой и пораженной конечностью после инсульта. Изучены биомеханические принципы, влияющие на развитие патологического стереотипа ходьбы, благодаря которым можно понять, как повлиять на более быстрое восстановление правильного стереотипа, а также выбрать индивидуальные методики физической реабилитации и ортезирования, позволяющие привести патологический стереотип к норме.

Ключевые слова: биомеханика ходьбы, инвалидизация пациентов, восстановление после инсульта, компенсаторные механизмы.

© Бронников В.А., Смычѐк В.Б., Складная К.А., Няшин Ю.И., Никитин В.Н., 2017

Бронников Владимир Анатольевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой медико-социальной экспертизы и реабилитации; директор, врач центра комплексной реабилитации инвалидов, Пермь
Смычѐк Василий Борисович, д.м.н., профессор, директор республиканского научно-практического центра медицинской экспертизы и реабилитации, Городище, Минский р-н, Республика Беларусь
Складная Ксения Александровна, врач-невролог центра комплексной реабилитации инвалидов, Пермь
Няшин Юрий Иванович, д.т.н., профессор кафедры теоретической механики и биомеханики, Пермь
Никитин Владислав Николаевич, старший преподаватель кафедры теоретической механики и биомеханики, Пермь

ВВЕДЕНИЕ

При восстановлении двигательной активности (мобильности) после мозгового инсульта нормальный стереотип ходьбы замещается патологическим (наиболее частой разновидностью которого является циркумдуцирующая походка). Циркумдуцирующая походка связана с полукруглым движением прямой ногой вокруг туловища (рис. 1).

При циркумдуцирующей походке нарушается привычная работа мышц тазобедренного сустава. Это связано с тем, что после инсульта повышается тонус в мышцах-разгибателях паретичной ноги, что связано с активацией познотонических рефлексов (рефлексы положения, обеспечивают перераспределение мышечного тонуса при изменении позы) за счет растормаживания моторных зон коры с целью обеспечения постурального контроля [3, 5]. В данных мышцах возникает спастичность (тонус по модифицированной шкале Ашфорт 3–4 балла), которая позволяет удержать тело в вертикальном положении, но приводит к иммобилизации голеностопного и коленного суставов. Нормальная работа трех суставов (голеностопного, коленного и тазобедренного суставов) заменяется работой только тазобедренного суставов, причем в несвойственной ему манере.

В настоящее время активно исследуются различные методики анализа позы и ходьбы при различных патологиях [4, 7, 8]. Особенности анализа походки у постинсультных пациентов связаны с широким распространением аппаратных методик восстановления ходьбы, что диктует необходимость использования более объективных методов оценки параметров произвольных движений. Анализ ходьбы затрагивает оценку биомеханических параметров движений в суставах: углов вращения, угловых скоростей и ускорений [9]. По мнению авторов, биомеханический анализ нормального и патологического стилей ходьбы позволит приблизиться к пониманию процессов восстановления двигательных способностей пациентов и разработать методики и подходы к восстановлению ходьбы, т.е. максимально приблизить патологический двигательный стереотип к правильному физиологическому.

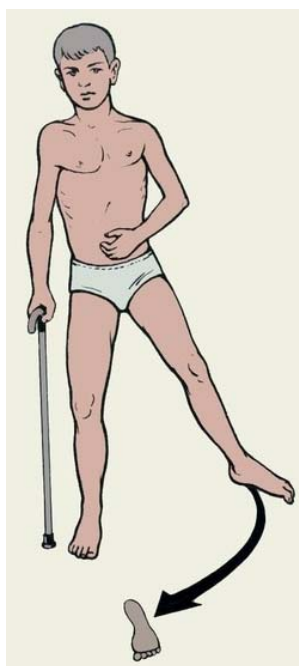


Рис. 1. Циркумдуцирующая походка (полукруглое движение прямой ногой вокруг туловища)

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для понимания причин увеличения амплитуды смещения центра масс туловища при циркулирующей походке рассмотрим тело человека как систему тел (рис. 2, а).

Тело разбивается на привычные в литературе звенья. В данной статье мы рассмотрим еще более упрощенный случай, связанный с тем, что будем считать туловище, голову, верхние конечности одним твердым телом (рис. 2, а).

Возьмем два случая положения равновесия тела человека в вертикальной плоскости:

- 1) при нормальном расположении нижних конечностей (см. рис. 2, а);
- 2) при патологическом расположении одной из нижних конечностей, когда пораженная нижняя конечность отведена вбок (см. рис. 2, б).

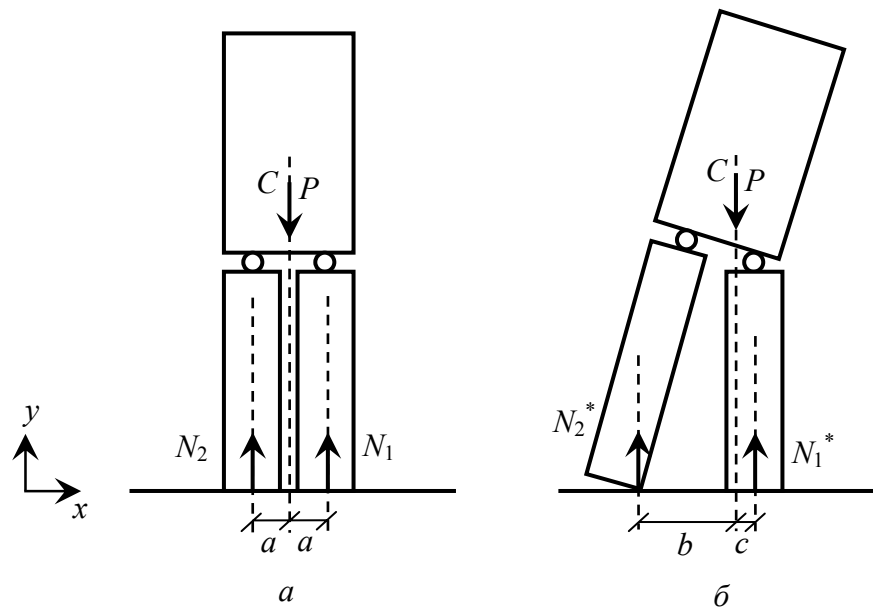


Рис. 2. Модель тела человека (P – вес тела; C – центр масс всего тела) (вид спереди):
а – при нормальном расположении нижних конечностей (N_1 – реакция опоры левой ноги; N_2 – реакция опоры правой ноги); б – при патологическом расположении одной из нижних конечностей (N_1^* – реакция опоры левой ноги; N_2^* – реакция опоры правой ноги)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Запишем систему уравнений для определения реакций опор для первого случая (рис. 3, а):

$$\begin{cases} \sum F_y = N_1 + N_2 - P = 0, \\ \sum M_C = N_1 a - N_2 a = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Решением данной системы будет то, что $N_1 = N_2 = P/2$.

Запишем систему уравнений для определения реакций опор для второго случая (см. рис. 3, б):

$$\begin{cases} \sum F_y = N_1^* + N_2^* - P = 0, \\ \sum M_C = N_1^* c - N_2^* b = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решением данной системы будет то, что $N_1^* = \frac{Pb}{b+c}$, $N_2^* = \frac{Pc}{b+c}$.

Чтобы качественно сравнить реакции для двух вышеупомянутых случаев, возьмем случай, когда $c = a/2, b = 2a$. В результате получим, что $N_1^* = 0,8P, N_2^* = 0,2P$.

Соответственно, сравнив реакции N_1, N_2, N_1^*, N_2^* , можно сделать вывод о том, что здоровая нога возьмет на себя дополнительно 30% нагрузки от веса тела, что непременно скажется на состоянии тазобедренного сустава данной конечности, а пораженная конечность примет на себя только 20% от веса тела.

Указанные расстояния a, b, c , фигурирующие в расчетах, могут быть определены при диагностике и анализе походки. Изменения амплитуды смещения центра масс, в частности, смещения линии действия веса тела к линии действия реакции в здоровой конечности на расстояние $d = a - c$ и изменение расстояния d на величину e , могут быть оценены в первом приближении благодаря системе «Траст-М» (рис. 3) (датчик, оценивающий изменение углов относительно трех взаимно перпендикулярных осей, размещается в районе пояса, соответствующем приблизительному расположению центра масс тела).



Рис. 3. Крепление датчика на пояс

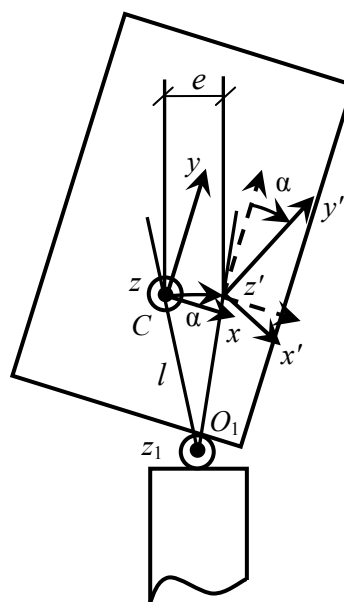


Рис. 4. Смещение центра масс тела C на величину e при выполнении шага, которому соответствует угол α (система координат xzy жестко связана с центром масс тела C , система координат $x'y'z'$ отражает положение туловища при повороте вокруг оси z_1 (точки O_1))

От угла поворота α вокруг оси z (центра масс тела C) в первом приближении можно перейти к смещению координаты центра масс тела C вдоль оси x , приняв допущение, что при наклоне тела вбок в процессе выполнения шага происходит поворот вокруг оси z_1 (точки O_1), проходящей через тазобедренный сустав и параллельной оси z , т.е. $e \approx l\alpha$ (рис. 4).

На рис. 5 приведена диаграмма угла поворота, т.е. угла α , вокруг оси z , перпендикулярной фронтальной плоскости. Этот угол отражает в первом приближении, на сколько происходит поворот вокруг каждого из тазобедренных суставов в процессе ходьбы.

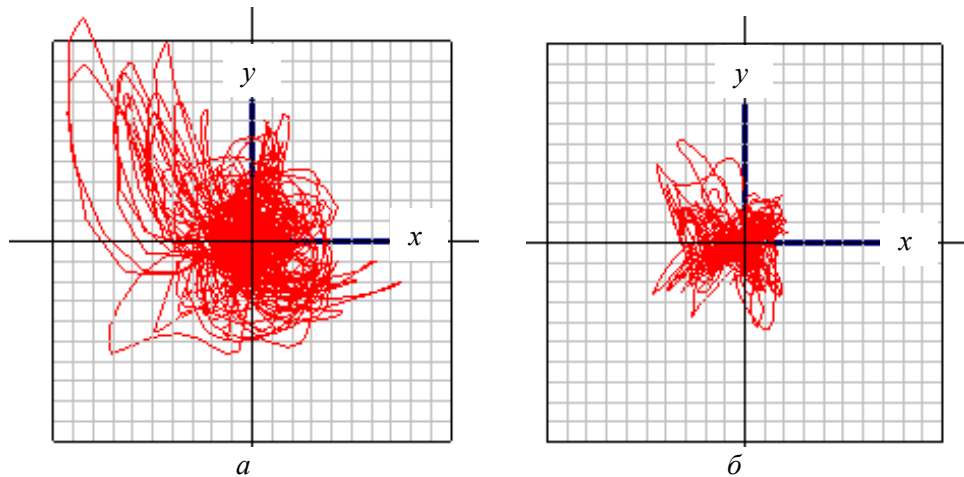


Рис. 5. Диаграммы угла поворота α вокруг оси z , перпендикулярной фронтальной плоскости (сетка имеет цену деления 0,1 градуса): a – при патологии (при циркумдуцирующей походке); b – в норме

Сравнив диаграммы углов поворота при циркумдуцирующей походке и в норме, можно сделать вывод, что при указанном патологическом стиле ходьбы имеется явная несимметрия относительно осей x и y .

Соответственно, зная расстояние l для конкретного пациента и диаграмму угла α , можно в первом приближении оценить, на сколько меняются реакции опор здоровой и пораженной ног в процессе выполнения шага.

Знание особенностей формирования патологического стереотипа ходьбы дает возможность не только планировать индивидуальную программу реабилитационных мероприятий, но и выбирать методы аппаратной кинезиотерапии согласно выраженности имеющихся биомеханических нарушений, а также разрабатывать индивидуализированную коррекцию патологического стереотипа при помощи технических средств реабилитации. Понимание механизмов формирования патологического стереотипа, а также оценка его степени выраженности с помощью определения биомеханических параметров ходьбы дает возможность осуществлять более индивидуализированные реабилитационные программы, а также повысить эффективность двигательной реабилитации у пациентов после инсульта. Оценка степени выраженности двигательных нарушений у пациента в поздний восстановительный период инсульта определяет дальнейшую стратегию, связанную либо с активацией специфических двигательных зон и восстановлением истинной функции ходьбы, либо с обеспечением функции ходьбы за счет компенсаторных механизмов [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было показано, что при циркумдуцирующей походке, связанной с полукруглым движением прямой ногой вокруг туловища, при опоре на обе (здоровую и пораженную) нижние конечности происходит перераспределение опорных реакций, которые повлияют на суставные реакции в тазобедренном, а также коленном и голеностопном суставах. Благодаря системе «Траст-М» получены зависимости углов, угловых скоростей от времени. Эта информация совместно с индивидуальными данными пациента может стать основой для анализа изменения опорных реакций, а далее и суставных реакций в указанных суставах с течением времени, что обеспечит необходимые знания о механизмах формирования, биомеханических особенностях и степени выраженности патологического стереотипа ходьбы после инсульта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в лице Министерства образования и науки Пермского края (Соглашение № С-26/004-01 от 12.01.2015 о предоставлении и целевом использовании субсидии на реализацию научного проекта международной исследовательской группой ученых на базе государственного образовательного учреждения и (или) научной организации Пермского края).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронников В.А., Смычѣк В.Б., Мавликаева Ю.А., Склянная К.А., Кравцов Ю.И., Плотникова О.А., Вильдеман А.В. Оценка восстановления двигательных функций у постинсультных пациентов в процессе комплексной реабилитации с использованием роботизированной кинезиотерапии // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2016. – Т. 116, № 9. – С. 30–34.
2. Бронников В.А., Смычѣк В.Б., Мавликаева Ю.А., Склянная К.А., Кравцов Ю.И., Горбачева А.О., Вильдеман А.В. Характеристика стабилметрических и клинических показателей у пациентов с последствиями инсульта в процессе комплексной реабилитации // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2016. – Т. 116, № 8. – С. 65–70.
3. Дамулин И.В., Кононенко Е.В. Двигательные нарушения после инсульта: патогенетические и терапевтические аспекты // Consilium medicum. – 2007. – № 2. – С. 86–91.
4. Деревцова С.Н., Зайцева О.И., Медведева Н.Н. Исследование ходьбы больных с синдромом центрального гемипареза // Вестник новых медицинских технологий. – 2012. – № 2. – С. 117–120.
5. Екушева Е.В., Дамулин И.В. Реабилитация после инсульта: значение процессов нейропластичности и сенсомоторной интеграции // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2013. – № 12. – С. 35–41.
6. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами. – М.: МБН, 2007. – 617 с.
7. Скворцова В.И., Иванова Г.Е., Климов Л.В., Скворцов Д.В. Тестирование баланса в вертикальном положении и функции ходьбы у больных с церебральным инсультом // Вестник восстановительной медицины. – 2012. – № 6. – С. 22–25.
8. Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2009. – № 6. – С. 5.
9. Kollen B., van de Port I., Lindeman E., Twisk J., Kwakkel G. Predicting improvement in gait after stroke: a longitudinal prospective study // Stroke. – 2005. – Vol. 36. – P. 2676–2680.

BIOMECHANICAL METHODS OF ANALYSIS OF MECHANISMS OF RESTORATION OF WALK OF PATIENTS IN THE LATE RECOVERY PERIOD OF A STROKE

**V.A. Bronnikov (Perm, Russia), V.B. Smychyok (Minsk, Belarus),
K.A. Sklyanaya, Y.I. Nyashin, V.N. Nikitin (Perm, Russia)**

In the recovery period of a stroke, the patient acquires such kind of walking stereotype, which is related to the work of the stored motion units. The body mobilizes the remaining opportunities, minimizes energy costs and changes the natural algorithms of movements, when the patient tries to restore the motion activity. The simplification of walking algorithms is mainly due to the fact that a variety of movements and the number of muscles involved in walking are minimized. So, the normal stereotype of walking, associated with the work of the ankle, the knee and the hip joints, is replaced by a pathological one, which is characterized mainly by the work of the hip joint. The work of the hip joint changes from rotation around the axis, perpendicular to the sagittal plane, to rotation around the axis, which is directed at an angle to the axial plane. We assume that this is due to the inclusion of

the torso muscles in the process of walking, which is associated with large amplitudes of the displacement of its centre of masses. This stereotype of walking, in our opinion, can be described with the help of the theorem on the change in the angular momentum of the system with respect to the vertical axis of rotation. Consideration of biomechanical principles that affect the development of the pathological stereotype of walking will allow understanding how one can influence the faster recovery of the correct stereotype, and also choose individual methods of physical rehabilitation and orthosis that allow bringing the pathological stereotype to the norm.

Key words: walking biomechanics, patients' disability, recovery after stroke, compensatory mechanisms.

Получено 24 сентября 2017