

УДК 611.71; 611.019; 591.4

Ф.Н.Гогин (5 курс, каф. МиПУ), Б.А.Смольников, к.ф.-м.н., проф.

ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ СТОПЫ

Стопа – сложный по своему строению и выполняемым функциям элемент нижней конечности. Стопа является рессорным, опорным и локомоторным аппаратом человеческого тела. Рессорная функция стопы связана с наличием в ней сводов. Различают два основных свода стопы – продольный и поперечный. Продольный свод имеет две части – медиальную (внутреннюю), называемую рессорной, и латеральную (наружную), называемую опорной.

Рессорная часть продольного свода образована пяточной, таранной, ладьевидной, тремя клиновидными, первой, второй и третьей плюсневыми костями. Высота его в среднем составляет 50-70 мм. Опорная часть продольного свода образована пяточной, таранной, кубовидной, четвертой и пятой плюсневыми костями. Высота его в среднем равна 20 мм.

Сводчатое строение стопы позволяет ей выступать в качестве “рессоры”, смягчающей удары о землю и производящей распределение тяжести тела.

Предложенная вниманию задача актуальна с двух точек зрения:

- во-первых, построение механической модели стопы связано с необходимостью лечения плоскостопия;
- во-вторых, механическая модель стопы может помочь при конструировании искусственных стоп.

Плоскостопие – деформация стопы, характеризующаяся уплощением ее сводов. Уплотнение продольного свода стопы приводит к развитию продольного плоскостопия, а распластанность переднего ее отдела – к поперечному.

В большинстве случаев лечение плоскостопия консервативное и зависит от выраженности деформации. При небольшой степени уплощения сводов назначают ортопедические стельки, ортопедическую обувь, физиотерапию. При больших деформациях сводов применяется оперативное вмешательство, которое включает традиционные операции, а также новые операции, которые требуют механического расчета стопы. Также механический расчет необходим для лечения посттравматического плоскостопия, возникающего в результате неправильного сращения переломов лодыжек, костей предплюсны и плюсны, повреждения связочного аппарата стопы.

Целью данного исследования является построение механической модели стопы, позволяющей получить качественное и количественное представление о взаимодействии костей и связок, формирующих стопу. В рамках данной работы мы будем рассматривать только упрощенную модель связочного аппарата стопы без учета влияния мышц на взаимное положение костей стопы.

Основные задачи, решаемые в рамках биомеханического подхода к проблеме плоскостопия:

- определение нагрузок на связки стопы при давлении массы тела;
- определение положения костей при выполнении стопой опорной функции (т.е. при давлении массы тела);
- определение сил реакций между костями стопы.

Объектом исследования является модель человеческой стопы, построенная на основе упрощающих предположений перечисленных ниже.

- кости являются абсолютно твердыми телами;
- вес костей в модели не учитывается;

- связки моделируются как пружины с жесткостью $c = 6 \cdot 10^7$ Н/м;
- распределенная нагрузка при взаимодействии костей заменяется точечной силой;
- хрящ, покрывающий суставную поверхность, обладает малым коэффициентом трения $f = 0.005 - 0.012$ и практически несжимаем.

Ниже приведены пояснения к упрощающим предположениям.

В нашей модели кости моделируются стержнями. При этом инерционные характеристики не важны, так как рассматривается равновесное положение модели. Масса стоп составляет 1.4 % от общей массы человеческого тела, поэтому вес костей стопы не учитывался. Кости имеют сложную геометрию, но на данном этапе она не играет роли.

Суставы моделируются шарнирами, в которых при приложении нагрузки происходит скольжение одной суставной поверхности по другой. Суставные поверхности имеют определенную кривизну.

Связки сустава соединяют две суставные поверхности и входят в состав суставной капсулы. Связки делятся на внутрисуставные и внесуставные. Независимо от вида, связки выполняют следующие функции:

- ограничивают движения в суставе;
- предотвращают разрушение сустава при приложении нагрузки.

В соответствии с основными функциями связки сустава в плоской модели связочный аппарат сустава заменен одной связкой (стабилизирующая связка). Стабилизирующая связка создает момент, который компенсирует момент от точечной реакции.

Точка опоры стопы, расположенная на пяточной кости, считается неподвижной. Точка опоры, расположенная на плюсневой кости, перемещается вдоль горизонтальной линии опоры.

Внешняя нагрузка, соответствующая весу тела, не меняет своего направления (остается вертикальной). Силы реакций в суставе направлены по нормали к суставным поверхностям.

В работе составлена кинематическая схема стопы, а также схема, на которой указаны направления силовых взаимодействий между элементами модели.

Получены уравнения статики в форме Ньютона, описывающие равновесное положение модели стопы при приложении нагрузки в виде веса тела. Уравнения содержат 10 неизвестных, среди которых неизвестные силы и углы (являющиеся степенями свободы модели).

Эти уравнения записаны с учетом числовых значений параметров связочного аппарата, а также параметров, относящихся к геометрии суставов стопы.

Полученная при подстановке числовых параметров нелинейная алгебраическая система уравнений описывает равновесное положение модели стопы при приложении нагрузки в виде веса тела в предположении, что углы относительного смещения костей малы, то есть не превышают 10^0 . Решение нелинейной системы алгебраических уравнений с помощью встроенных процедур программы символьной математики Maple 8 не дало результатов. Но необходимо отметить, что концепция (идея) построения модели стопы позволит проводить дальнейший анализ, несмотря на трудности с численной реализацией.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бернштейн Н.А. Биомеханика и физиология движений – М.: Наука, 1990 г.
2. Б.С. Фарбер Биомеханика опорно-двигательного аппарата – М.: 1991 г.
3. П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло Биомеханика – СПб.: Политехника, 2000 г.
4. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. – М.: Наука, 1991 г.
5. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека: В 3 т. – Т.1. – М.: Медицина, 1978 г.