

## **1. Анкетные данные**

ФИО: Земляков Александр Викторович

Год рождения: 1991 г.

Образование: Волгоградский Государственный Технический Университет, 2013 г.,  
бакалавр физики по направлению «Физика»

Волгоградский Государственный Технический Университет, 2015 г., магистр физики  
по направлению «Физика»

## **2. Достижения в результате освоения основной образовательной программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре**

Изучение дисциплин кандидатского минимума «Иностранный язык» и «История и философия науки». Подготовлено обоснование темы диссертации, формулировка целей и постановка задачи исследования.

**Тема диссертационного исследования:** динамически обусловленные физико-химические трансформации газа в межзвёздных молекулярных облаках.

### 3. Достижения в научно-исследовательской деятельности

1. Земляков, А. В. Пространственная модель элементов голеностопа в нелинейном случае / А. В. Земляков и др. // Известия ЮЗГУ. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение, – 2015, – №3(16), – 98-102 С.

98

ISSN 2223-1536. Известия Юго-Западного государственного университета.

УДК 681.518.3

**А.В. Земляков**, магистрант, Волгоградский государственный технический университет  
(e-mail: alex.1307@mail.ru)

**О.А. Тубол**, магистрант, Волгоградский государственный технический университет  
(e-mail: sila9876@mail.ru)

**В.А. Байдаченко**, магистрант, Волгоградский государственный технический университет  
(тел.: (906)1743664)

**Ю.П. Муха**, д-р техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (e-mail: muxaup@mail.ru)

#### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ГОЛЕНОСТОПА В НЕЛИНЕЙНОМ СЛУЧАЕ

*При создании передвигающихся механических средств невозможно не учитывать плавность хода, иными словами, антропоморфность движения. Одним из важных факторов, влияющих на плавность хода, является голеностопный сустав, точная модель которого позволяет повышать антропоморфность движения.*

*Ключевые слова:* стопа, кости, связки, голеностопный сустав, нагрузка.

\*\*\*

#### Введение

В настоящее время большинство теоретических и практических разработок шагающих машин или протезов ориентированы на рассмотрение механических систем с абсолютно жёсткими звеньями. Такие модели имеют некоторые достоинства: проще уравнения движения, численное и аналитическое исследование составленных уравнений. Однако есть и недостатки – скорость распространения возмущений в абсолютно жёсткой модели бесконечно большая. При движении живых организмов, например при ходьбе человека, ускорения каждого элемента системы очень велики, и если бы звенья были абсолютно жёсткими, то ударная нагрузка в организме распространялась бы на все элементы системы мгновенно, т.е. ударом, в том числе и на головной мозг. В реальности подобные явления не наблюдаются. Поэтому следует рассматривать организм как структурно-упругую систему. При движении деформируемой системы происходит запасание энергии при постановке ноги на поверхность и её возвращение при следующем шаге. При этом практически вся энергия удара гаснет в суставах нижней конечности. Если рассматривать конечность в целом, то можно считать, что деформируется не сам сустав, а весь её «стержень». В этом

случае целесообразно использовать модель с деформируемыми звеньями и возможностью приложения в суставах моментов, с помощью которых можно поддерживать вертикальное положение и осуществлять перемещение. Таким образом, система эффективно моделируется деформируемыми стержнями с упругим противодействием и смещением сустава.

Стопа – это одна из самых удивительных частей тела. Она способна выдерживать различного рода нагрузки и в то же время обеспечивать плавность хода из-за хороших мышц и связок. Известно, что в стопе находится четверть всех костей организма [1]. Её основной элемент – голеностопный сустав, включающий в себя несколько костей.

Попытки смоделировать движение человека продолжают уже продолжительное время. Одна из первых простых и удачных попыток приведена в работе [2], где мышечная ткань представлена нерастяжимыми идеальными звеньями. В работе [5] мышцы представлены биомеханической моделью, которая состоит из трёхкомпонентной системы. В нашей работе будут опущены два из них и рассмотрены только упругие компоненты без демпфирования.

Все существующие ныне модели рассматривают стопу как единое целое, что, по нашему мнению, является суще-

ственным упущением, так как она оказывает на плавность хода сильное влияние. Поэтому, дабы восполнить модель и придать большую антропоморфность движению, была рассмотрена стопа с учётом

нелинейностей, представленных в виде связок, и создана её математическая модель.

На рисунке 1 показана упрощённая модель стопы.

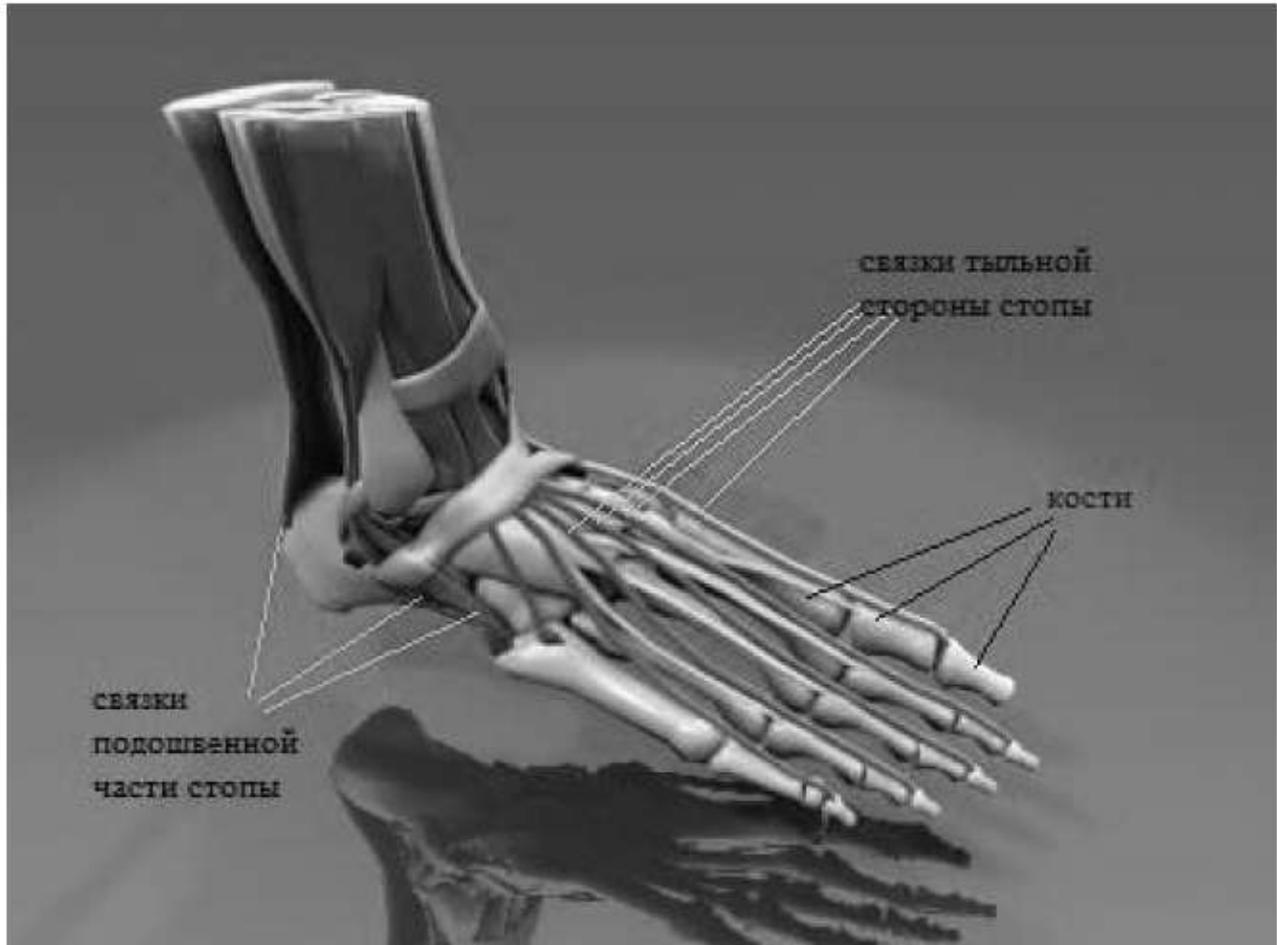


Рис. 1. Структурная схема элементов стопы

При составлении данной модели оказываются неучтёнными 4 кости и те взаимодействия, которые проходят между костями без прикрепляющихся к ним связок или мышц.

#### Постановка задачи

Цель исследования – создание полной математической модели, описывающей все нагрузки на кости с учётом нелинейностей. Данная работа подразумевает упрощённый вариант, который впоследствии будет использоваться для создания более точной модели. И только её результаты можно будет учитывать в процессе проектирования протезируемых устройств или создания роботов.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих задач:

1. Осуществить математическое моделирование взаимодействия двух костей с учётом прикрепления к ним связок (мышц).

2. Реализовать полученную модель на все возникающие взаимодействия костей и связок.

#### Математическое моделирование

Представим взаимодействие двух костей и связок в виде системы двух нерастяжимых спиц с прикреплёнными к ним мышцами (связками). Такая система представлена на рисунке 2. Здесь связки обозначены как пружины, т.е. представляют собой только упругие компоненты без учёта демпфирования.

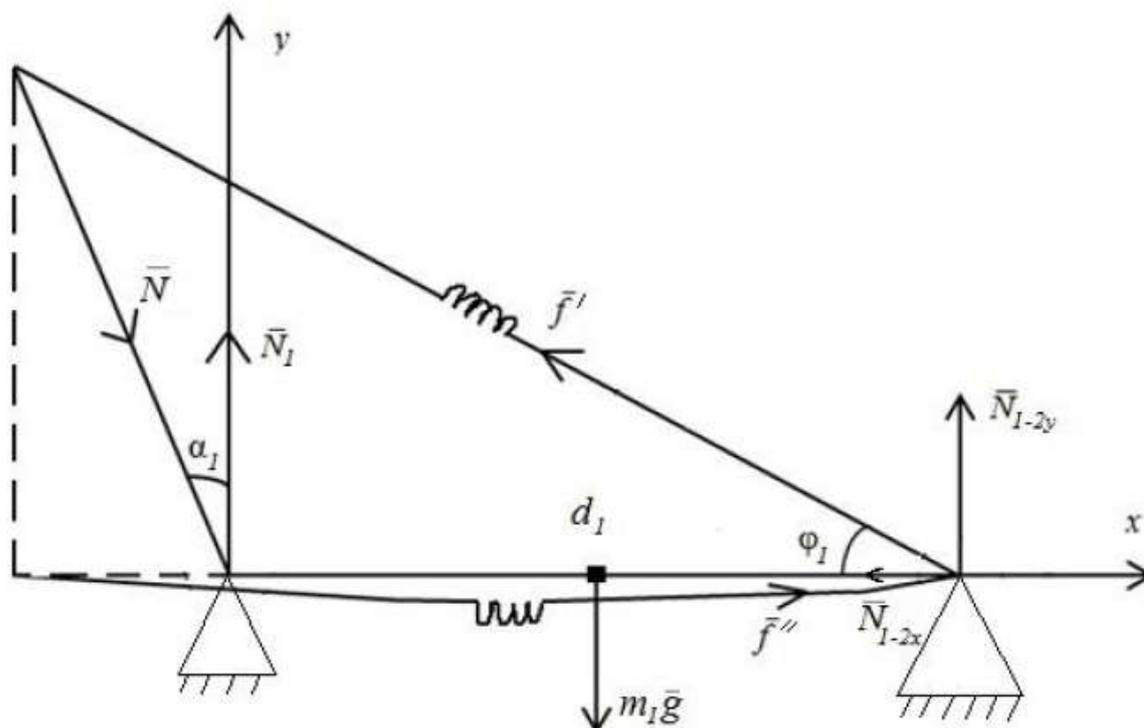


Рис. 2. Модель взаимодействия двух костей с учётом прикреплённых на них связок

Эта модель была приведена в работе [3]. В ней кости представлены в виде нерастяжимых спиц, а связки – в виде пружин.

Равновесие плоской системы сил описывается с помощью системы уравнений [4]

$$\begin{cases} \sum M_{oi} = 0, \\ \sum X_i = 0, \\ \sum Y_i = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Опираясь на рисунок 2, система уравнений (1) запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d_1}{2} N_{1-2y} - N \frac{d_1}{2} \cos \alpha_1 - N_1 \frac{d_1}{2} - \frac{d_1}{2} f' \cos \varphi_1 = 0; \\ f'' + N \sin \alpha_1 - N_{1-2x} - f' \cos \varphi_1 = 0; \\ N_{1-2y} - N \cos \alpha_1 - m_1 g + N_1 + f' \sin \varphi_1 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где длина 1-й кости обозначена как  $d_1$ ;

$m_1$  – масса кости;

$\alpha_1$  – угол приложения нагруженной силы ( $N$ );

$\varphi_1$  – угол прикрепления тыльной связки;

сила реакции 1-й кости при приложении внешней нагрузки  $N - N_1$ .  $f'$  и  $f''$  обозначены упругие компоненты силы, возникающие в соответствующих связках, куда входят коэффициенты упругости связок.

Здесь и в дальнейшем одним штрихом будут обозначаться связки с тыльной стороны, двумя штрихами – связки с подошвенной части. Нагрузку  $N_{1-2}$ , которая идёт дальше на 2-ю кость, разложили на две составляющие по осям абсцисс и ординат.

Решая систему (2) и учитывая то, что  $N_{1-2} = \sqrt{N_{1-2x}^2 + N_{1-2y}^2}$ , можно получить искомую нагрузку:

$$N_{1-2} = \sqrt{\left(f'' + N \sin \alpha_1 - f' \cos \varphi_1\right)^2 + \left(N \cos \alpha_1 + \frac{m_1 g}{2} - \frac{f'}{2} \theta_1\right)^2} \quad (3)$$

где  $\theta_1 = \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1$ .

Перейдём от простой модели взаимодействия двух костей со связками к более сложной. Рассмотрим большой па-

лец стопы. Его нагрузка распределяется по шести костям плюс различного рода связки. Схематически он представлен на рисунке 3.

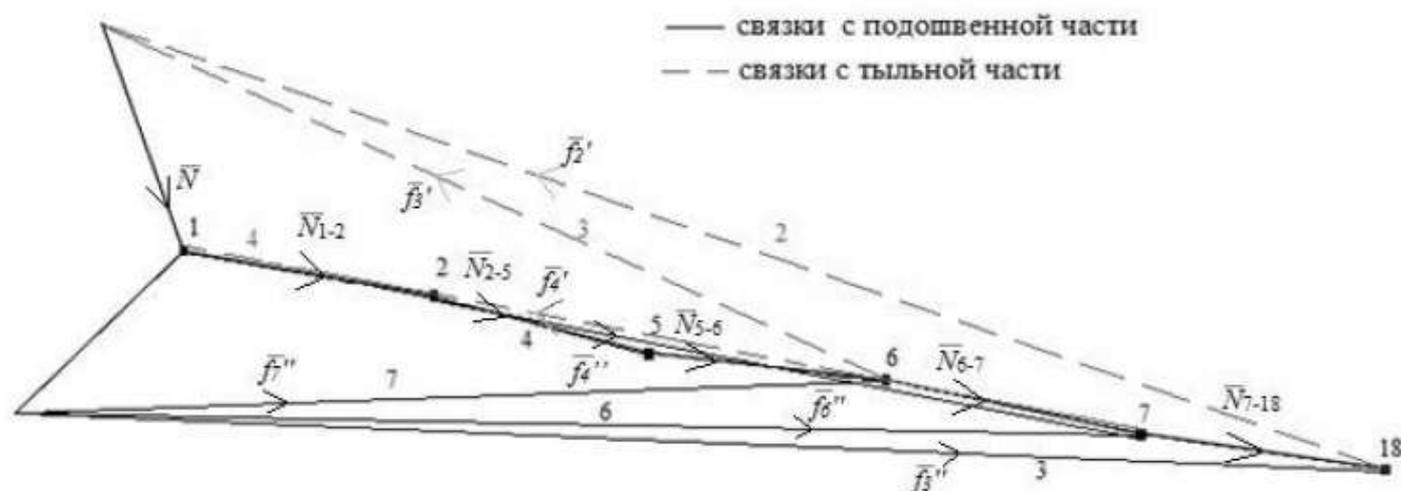


Рис. 3. Схема большого пальца

На рисунке 3 точками 1, 2, 5, 6, 7, 18 обозначены начала костей, которые участвуют в распределении нагрузки по данному пальцу, цифрами 2, 3, 4 – номера связок, прикреплённых к соответствующим по анатомии костям с тыльной стороны стопы, и цифрами 3, 4, 6, 7 – номера связок с подошвенной части стопы.

Далее будем рассматривать поэлементно взаимодействие костей и связок, начиная с первой прикреплённой от кости под номером 1. Из рисунка 3 видно, что первым таким случаем будет взаимодействие между 5 и 6 костями. Это взаимодействие соответствует тому, которое было рассмотрено в начале статьи, поэтому, опираясь на приведённые выкладки, можно получить искомую нагрузку:

$$N_{5-6} = \sqrt{\left(f_7'' + N_{2-5} \sin \alpha_5 - f_3' \cos \varphi_5\right)^2 + \left(N_{2-5} \cos \alpha_5 + \frac{m_5 g}{2} - \frac{f_3'}{2} \theta_5\right)^2} \quad (4)$$

Из рисунка 3 видно, что дальнейшие взаимодействия между элементами идентичны рассмотренному выше, поэтому

проделывая те же операции для последующих костей, можно получить следующие нагруженные силы:

$$N_{6-7} = \sqrt{\left(f_6'' + f_4'' + N_{5-6} \sin \alpha_6 - f_4' \cos \varphi_6\right)^2 + \left(N_{5-6} \cos \alpha_6 + \frac{m_6 g}{2} - \frac{f_4'}{2} \theta_6\right)^2} \quad (5)$$

$$N_{7-18} = \sqrt{\left(f_3'' + N_{6-7} \sin \alpha_7 - f_2' \cos \varphi_7\right)^2 + \left(N_{6-7} \cos \alpha_7 + \frac{m_7 g}{2} \frac{f_2'}{2} \theta_7\right)^2}. \quad (6)$$

Выполняя аналогичные выводы для остальных пальцев, можно получить искомые нагружающие силы голеностопа для устойчивого положения с учётом нелинейностей.

### Заключение

В результате проведённых исследований и допущений была получена первая приближенная модель взаимодействия костей большого пальца стопы с учётом закреплённых связок. Все нелинейности учтены силами упругости  $f$ , от точности определения которых зависит, насколько будет правдоподобна данная модель.

### Список литературы

1. Сапин М.Р., Никитюк Д.К. Карманый атлас анатомии человека. – Элиста: АПП «Джангар», 1999. – 680 с.

2. Формальский А.М. Перемещение антропоморфных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 368 с.

3. Zemlyakov A.V., Tubol O.A. Spatial model of ankle // Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. – Prague, 2014. – №2. – С. 167-169

4. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики: в 3 ч. – Ч. 2. Статика. Кинематика. – М.: Высшая школа, 1966. – 440 с.

5. Запирский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н. Биомеханика двигательного аппарата человека. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.

*Получено 29.06.15*

**A.V. Zemlyakov**, Undergraduate, Volgograd State Technical University (e-mail: alex.1307@mail.ru)

**O. A. Tubol**, Undergraduate, Volgograd State Technical University (e-mail: sila9876@mail.ru)

**V.A. Baydachenko**, Undergraduate, Volgograd State Technical University (ph. (906)1743664)

**Y.P. Mucha**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (e-mail: muxaup@mail.ru)

### THE SPATIAL MODEL OF ANKLE ELEMENTS IN THE NONLINEAR CASE

*When creating a moving mechanical device it is impossible to ignore the smoothness of motion, in other words the anthropomorphic nature of the movement. One of the most important factors affecting the smoothness is the ankle joint, whose exact model allows to improve the anthropomorphic nature of the movement.*

**Key words:** foot, bones, ligaments, ankle joint, the load.

2. Тубол, О.А. Пространственная модель голеностопа / О.А. Тубол, А.В. Земляков, В.А. Байдаченко // Инновации на основе информационных и коммуникационных

технологий: Материалы международной научно-практической конференции. // Научн. ред. А.Н. Тихонов; Общ. ред. С.У. Увайсов; Отв. ред. И.А. Иванов, – М.: НИУ ВШЭ, - 2014, - С. 146-149

3. Zemlyakov, A.V. Spatial model of ankle / A.V. Zem-lyakov, V.A. Baydachenko, O.A. Tubol // Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference, – Prague, 2014, – №2, – С. 167-169