

Бегун П. И.

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7469-969X>

Scopus-Author ID 57094987100

Доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
E-mail: petrbegin1114@mail.ru

## ПРИВЕДЕНИЕ СИЛ ТЯГИ МЫШЦ, ФИКСИРУЮЩИХ ВНЕШНЮЮ НАГРУЗКУ

**Цель работы.** Разработать методику и алгоритм определения сил тяги в мышцах и сил в суставах конечностей при действии внешних нагрузок.

В работах по биомеханике мышц, при рассмотрении двигательных действий, или не рассматриваются вопросы приведения сил тяги мышц, фиксирующих внешнее воздействие [1, 2], или, например [3], приведены модели, не адекватные рассматриваемому вопросу. В то же время, анализ приведения сил тяги мышц от одной кости к другой позволяет оценить как усилия, возникающие в суставах, так и в самих мышцах.

**Методология.** Последовательными преобразованиями все силы приводятся в центры суставов. При приведении сил использован принцип Сен-Венана: «На достаточном удалении от места приложения к телу системы сил, эквивалентной нулю, напряжения и деформации отсутствуют». Возможности разработанного алгоритма проиллюстрированы на примере приведения силы тяжести головы, верхних конечностей и туловища к стопе с учетом антигравитационных мышц нижних конечностей, противодействующих этой силе.

**Научная новизна.** Разработанный алгоритм позволяют оценивать усилия, создаваемые в мышцах и структурах суставов внешними силами при различных положениях двигательного аппарата человека.

**Выводы.** Разработана методика определения сил тяги в мышцах и сил в суставах при действии внешних нагрузок. Алгоритм исследования сил тяги в мышцах и сил в суставах представляет собой открытую систему. Например, в развитие рассмотренного примера, можно учитывать вес звеньев нижней конечности (бедро, голени и стопы) и силы мышц, являющихся антагонистами антигравитационным мышцам: мышца-сгибателей бедра, мышца задней поверхности бедра, а также мышца голени, осуществляющих разгибание стопы.

**Ключевые слова:** алгоритм, сила, мышца, сустав.

**Постановка проблемы.** В работах по биомеханике мышц, при рассмотрении двигательных действий, или не рассматриваются вопросы приведения сил тяги мышц, фиксирующих внешнее воздействие [1; 2], или, например [3], приведены модели, не адекватные рассматриваемому вопросу. В то же время, анализ приведения сил тяги мышц от одной кости к другой позволяет оценить усилия, возникающие как в суставах, так и в самих мышцах.

**Цель работы.** Разработать методику и алгоритм определения сил тяги в мышцах и сил в суставах конечностей при действии внешних нагрузок.

**Методология.** В построенной модели двигательного аппарата человека внешняя сила  $P$ , приложенная к звену, приводится к центру сустава, соединяющего его с последующим звеном. К центру сустава прикладываются коллинеарно силе  $P$  две силы равные  $P$  и противоположно направленные. Внешняя сила  $P$  и противоположная в центре сустава создают пару сил с моментом  $M$ . Силу мышцы  $P_{m1}$ , приложенной к этому звену, так же в рамках принципа Сен – Венана прикладываем к центру этого сустава и получаем пару сил. Момент, создаваемый мышечной силой, уравновешивает момент внешней силы, а на сустав со стороны звена передаются силы  $P$  и  $P_{m2}$ . Сила  $P_{m2} = P_{m1}$ . Далее со стороны следующего звена к центру этого сустава приводим силу  $P_{m2}$ . Получим пару сил и силу  $P_{m2}$ . Алгебраически сумма сил  $P_{m2}$ ,  $P_{m1}$  действует на структуры внутри сустава.

В результате со стороны первого звена на второе передается момент и сила  $P$ . Далее последовательность действий по приведению сил и определению тяговых сил в мышцах и сил в суставах двигательного аппарата повторяется.

**Научная новизна.** Разработана методика и построен алгоритм определения сил тяги в мышцах и сил в суставах при действии внешних нагрузок.

**Результаты исследования.** Рассмотрим приведение силы тяжести  $P_T$  головы, верхних конечностей, туловища к стопе с учетом антигравитационных мышц нижних конечностей, противодействующих этой силе (рис. 1). На рис. 2, а приведены схемы: туловища (1), бедренной (2) и берцовых (3) костей; тазобедренного сустава (ТС), коленного сустава (КС), голеностопного сустава (ГС), ступни (4), антигравитационных мышц (5).

На рис. 2–4 стрелками обозначены направления мышечных сил в местах прикрепления мышц: мышц-разгибателей бедра (большая ягодичная и мышцы задней поверхности бедра) –  $P_{M1}$ ,  $P_{M2}$ ; мышц-разгибателей голени (четырёхглавая мышца бедра) –  $P_{M3}$ ,  $P_{M4}$ ; подошвенных сгибателей стопы (трехглавая мышца голени) –  $P_{M5}$ ,  $P_{M6}$ . При этом  $P_{M1} = P_{M2}$ ;  $P_{M3} = P_{M4}$ ;  $P_{M5} = P_{M6}$ .

Приведем последовательно все силы в центры суставов. При приведении сил воспользуемся принципом Сен – Венана.

Определим воздействие со стороны первого звена на второе.

1. Приведем, приложенные к звену 1 силы  $P_T$  и  $P_{M1}$  к центру ТС (рис. 2, а): 1.1. Приложим к центру ТС две силы, равные  $P_T$  и противоположно направленные (рис. 2, б) – получим пару сил с моментом  $P_T \cdot h_1$ , направленным по часовой стрелке и силу  $P_T$ ; 1.2. Приложим к центру ТС две силы равные  $P_{M1}$  и противоположно направленные (рис. 2, в) – получим пару сил с моментом  $P_{M1} \cdot a_1$  направленным против часовой стрелке и силу  $P_{M1}$ ; 1.3. Моменты  $P_T \cdot h_1$  и  $P_{M1} \cdot a_1$  уравнивают друг друга; 1.4. На ТС со стороны звена 1 передаются силы  $P_T$  и  $P_{MT1}$ .



**Рис. 1. Схема приложения силы тяжести и положений тяги мышц**

На рис. 2–4 стрелками обозначены направления мышечных сил в местах прикрепления мышц: мышц-разгибателей бедра (большая ягодичная и мышцы задней поверхности бедра) –  $P_{M1}$ ,  $P_{M2}$ ; мышц-разгибателей голени (четырёхглавая мышца бедра) –  $P_{M3}$ ,  $P_{M4}$ ; подошвенных сгибателей стопы (трехглавая мышца голени) –  $P_{M5}$ ,  $P_{M6}$ . При этом  $P_{M1} = P_{M2}$ ;  $P_{M3} = P_{M4}$ ;  $P_{M5} = P_{M6}$ .

Приведем последовательно все силы в центры суставов. При приведении сил воспользуемся принципом Сен – Венана. Определим воздействие со стороны первого звена на второе.

2. Приведем к центру ТС силы, действующие со стороны второго звена 2. Приложим к центру ТС две силы равные  $P_{M2}$  и противоположно направленные (рис. 2, з) – получим пару сил с моментом  $P_{M2} \cdot a_2$  направленным по часовой стрелке и силу  $P_{M2}$ .

3. Сила  $P_{M1}$  действует со стороны первого звена на второе, а сила  $P_{M2}$  – со второго на первое. Они равны между собой, как усилия на концах одной мышцы, но линии действия их не совпадают. Так как силы принадлежат двум разным входящим в сустав звеньям, их алгебраическая сумма представляет силу, с которой они действуют на структуры внутри сустава (рис. 2, д) и воспринимаются анатомическими образованиями суставов.

4. В результате: со стороны первого звена на второе передается действующий по часовой стрелке момент  $M_{12}$ , равный  $P_{M2} \cdot a_2$  и сила  $P_T$ . (рис. 2, д).

Определим воздействие со стороны второго звена на третье.  $P_{M3}$  и  $P_{M4}$  – силы антигравитационной четырехглавой мышцы бедра, приложенные соответственно к звеньям 2 и 3 (рис. 3).

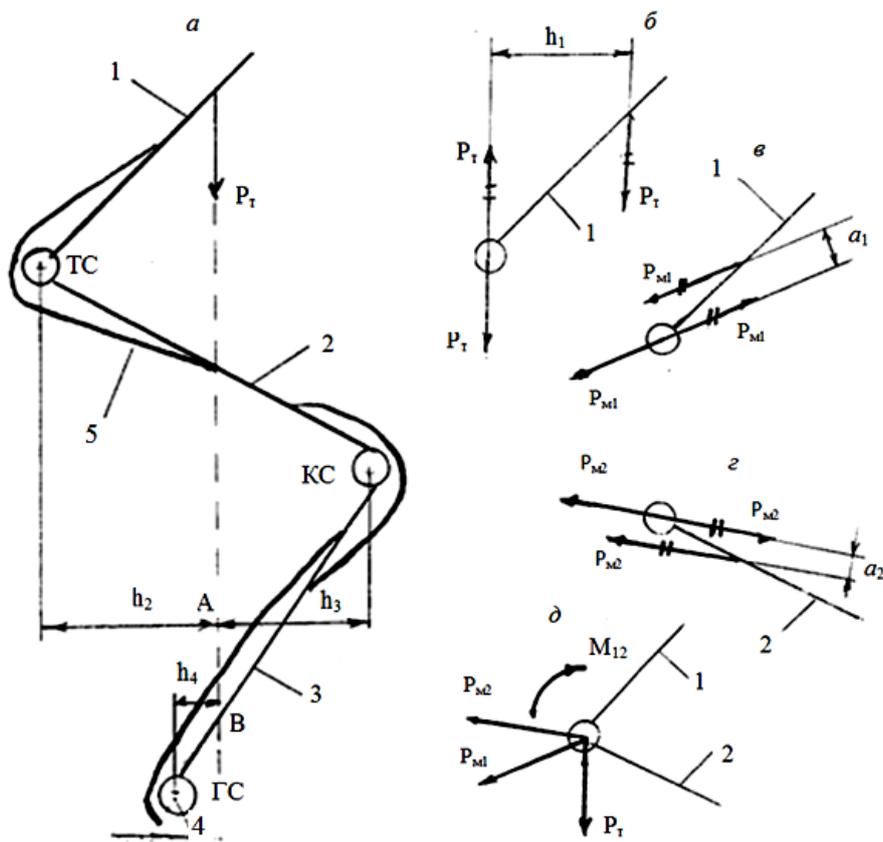


Рис. 2. Схемы последовательного приведения сил, приложенных к звену 1 к тазобедренному суставу и звену 2

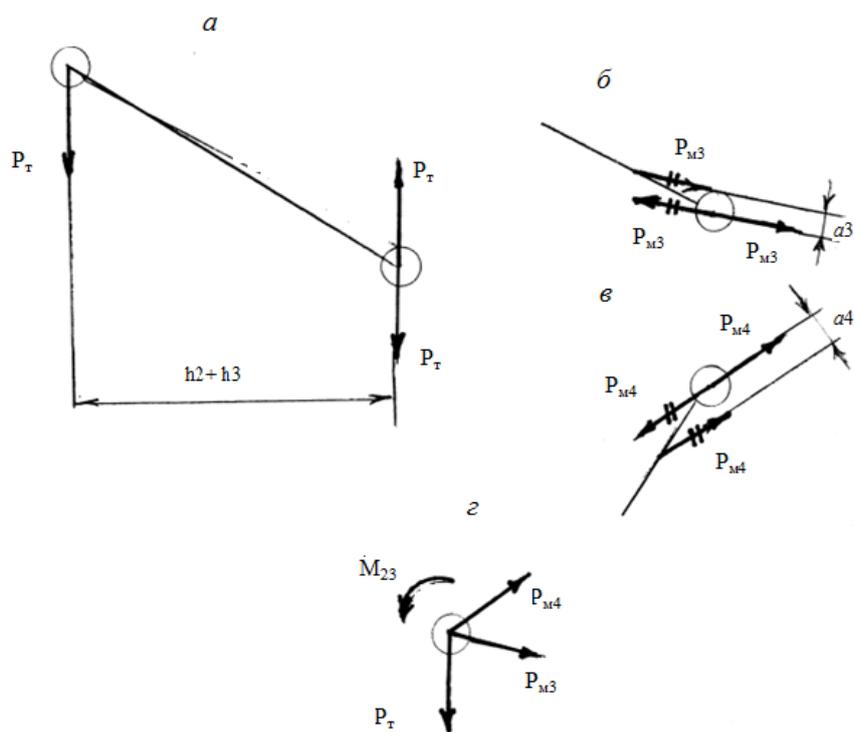


Рис. 3. Схемы последовательного приведения сил, приложенных к звену 2, к коленному суставу и звену 3

1. Приведем приложенные к звену 2 силы  $P_T$  и  $P_{M3}$  к центру КС: 1.1. Приложим к центру КС две силы, равные  $P_T$  и противоположно направленные (рис. 3, а) – получим пару сил с моментом  $P_T \cdot (h_2 + h_3)$ , направленным против часовой стрелки и силу  $P_T$ ; 1.2. Приложим к центру КС две силы равные  $P_{M3}$  и противоположно направленные (рис. 3, б) – получим пару сил с моментом  $P_{M3} \cdot a_3$  направленным по часовой стрелке и силу  $P_{M3}$ ; 1.3. Моменты  $P_T \cdot (h_2 + h_3)$  и  $P_{M3} \cdot a_3$  уравнивают друг друга; 1.4. На КС со стороны звена 2 передаются силы  $P_T$  и  $P_{M3}$ .

2. Приведем к центру КС силы, действующие со стороны звена 3. Приложим к центру КС две силы, равные  $P_{M4}$  и противоположно направленные (рис. 3, в) – получим пару сил с моментом  $P_{M4} \cdot a_4$ , направленным против часовой стрелки и силу  $P_{M4}$ ;

3. Сила  $P_{M3}$  действует со стороны второго звена на третье, а сила  $P_{M4}$  – с третьего на второе. Они равны между собой, как усилия на концах одной мышцы, но линии действия их не совпадают. Так как силы принадлежат двум разным входящим в сустав звеньям, их алгебраическая сумма представляет силу, с которой они действуют на структуры внутри сустава (рис. 3, з) и воспринимаются анатомическими образованиями сустава.

4. В результате: со стороны второго звена на третье передается действующий против часовой стрелки момент  $M_{23}$ , равный  $P_{M4} \cdot a_4$  и сила  $P_T$  (рис. 3, з).

Определим воздействие со стороны третьего звена на четвертое.  $P_{M5}$  и  $P_{M6}$  – силы антигравитационной трехглавой мышцы голени, приложенные соответственно к звеньям 3 и 4.

1. Приведем, приложенные к звену 3 силы  $P_T$  и  $P_{M5}$  к центру ГС: 1.1. Приложим к центру ГС две силы, равные  $P_T$  и противоположно направленные (рис. 4, а) – получим пару сил с моментом  $P_T \cdot h_4$  направленным по часовой стрелке и силу  $P_T$ ; 1.2. Приложим к центру ГС две силы равные  $P_{M5}$  и противоположно направленные (рис. 4, б) – получим пару сил с моментом  $P_{M5} \cdot a_5$  направленным против часовой стрелки и силу  $P_{M5}$ ; 1.3. Моменты  $P_T \cdot h_4$  и  $P_{M5} \cdot a_5$  уравнивают друг друга; 1.4. На ГС со стороны звена 3 передаются силы  $P_T$  и  $P_{M5}$ .

2. Приведем к центру ГС силы, действующие со стороны звена 4.

Приложим к центру ГС две силы, равные  $P_{M6}$  и противоположно направленные (рис. 4, в) – получим пару сил с моментом  $P_{M6} \cdot a_6$  направленным по часовой стрелке и силу  $P_{M6}$ ;

3. Сила  $P_{M5}$  действует со стороны третьего звена на четвертое, а сила  $P_{M6}$  – с четвертого на третье. Они равны между собой, как усилия на концах одной мышцы, но линии действия их не совпадают. Так как силы принадлежат двум разным входящим в сустав звеньям, их алгебраическая сумма представляет силу, с которой они действуют на структуры внутри сустава (рис. 4, з) и воспринимаются анатомическими образованиями сустава.

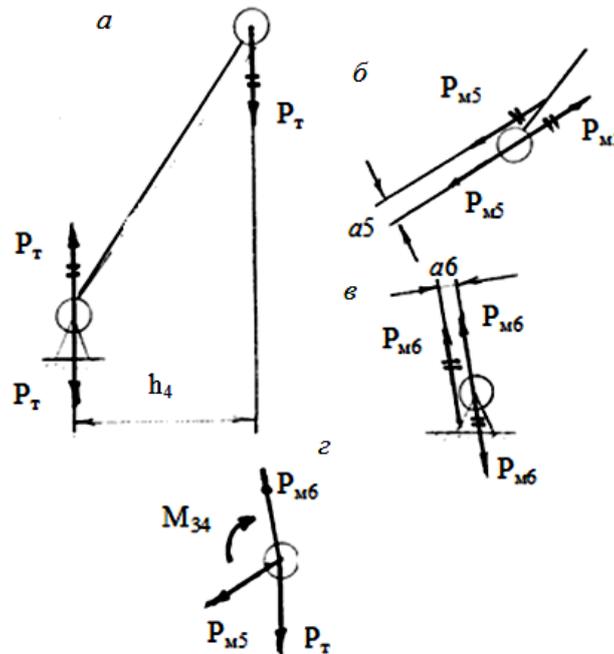


Рис. 4. Схемы последовательного приведения сил, приложенных к звену 3 к голеностопному суставу и звену 4

4. В результате: со стороны третьего звена на четвертое передается действующий по часовой стрелке момент  $M_{34}$ , равный  $P_{M6} \cdot a_6$  и сила  $P_T$ . (рис. 4, з).

**Выводы.** Разработана методика и построен алгоритм определения сил тяги в мышцах и сил в суставах при действии внешних нагрузок. Алгоритм исследования сил тяги в мышцах и сил в суставах представляет собой открытую систему. Проведенные преобразования позволили оценить усилия, создаваемые антигравитационными мышцами: ягодичной, обслуживающей в основном ТС, четырехглавой мышцей бедра – КС, трехглавой мышцей голени – ГС и усилия в структурах суставов. В развитие рассмотренного примера, можно учитывать вес звеньев нижней конечности (бедра, голени и стопы) и силы мышц, являющихся антагонистами антигравитационным мышцам: мышц-сгибателей бедра, мышц задней поверхности бедра, а также мышц голени, осуществляющих разгибание стопы.

## References

1. Дубровский В. И., Федорова В. Н. Биомеханика: учеб. для сред. и высш. учеб. заведений. Москва: «ВЛАДОС-ПРЕСС», 2003. 672 с.  
Dubrovski, V. I. & Fedorova, V. N. (2003). Biomechanika: ucheb. dlja sred, i vyssh. ucheb. zavedenij [Biomechanics: textbook for secondary and higher educational institutions]. Moscow, Russia: «VLADOS-PRESS».
2. Самсонова А. В. Биомеханика мышц: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург, 2008. 127 с.  
Samsonova, A. V. (2008). Biomehanika myshc: uchebno-metodicheskoe posobie [Muscle biomechanics: educational-methodical manual]. St. Petersburg, Russia.
3. Кичайкина Н. Б. Биомеханические закономерности упражнений с сохранением положения тела, локомоторных и вращательных движений: уч. пособие Санкт-Петербург, 2014. 51с.  
Kichajkina, N. B. (2014). Biomehanicheskie zakonomernosti uprazhnenij s sohraneniem polozhenija tela, lokomotornyh i vrashhatelnyh dvizhenij: uchebnoe posobie [Biomechanical patterns of exercises while maintaining body position, locomotor and rotational movements: educational-methodical manual]. St. Petersburg, Russia.

Begun P.

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7469-969X>

Scopus-Author ID 57094987100

Doctor of Technical Sciences, Professor

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
(St. Petersburg, Russian Federation) E-mail: petrbegin1114@mail.ru

## CASTING THE TRACTION FORCES OF MUSCLES THAT FIX THE EXTERNAL LOAD

**Article purpose.** *The main goal is to develop a methodology and algorithm for determining traction forces in muscles and forces in joints of limbs under the action of external loads. In the papers on the biomechanics of muscles, when considering motor actions, either the issues of casting the traction forces of muscles that fix the external impact [1-3] are not considered or models are not adequate for the issue under consideration. At the same time an analysis of the casting of muscle traction forces from one bone to another makes it possible to evaluate both the forces arising in the joints and the forces in the muscles themselves.*

**The methodology** *is the following. By successive transformations all forces are brought to the centres of the joints. In casting the forces, the Saint-Venant principle was used: "At a sufficient distance from the place of application of the system of forces to the body, there are no stresses and strains equivalent to zero". The capabilities of the developed algorithm are illustrated by the example of casting the gravity forces of the head, upper limbs and trunk to the foot, taking into the account the anti-gravity muscles of the lower extremities which counteract this force.*

**The scientific novelty** *is that the developed algorithm allows us to evaluate the efforts created in the muscles and structures of the joints by external forces at various positions of the human motor apparatus.*

**Conclusions.** *A technique for determining traction forces in muscles and forces in joints under the action of external loads has been developed. The algorithm for studying traction forces in muscles and forces in joints is an open system. For example in the development of the considered example it is possible to take into account the weight of the links of the lower limb (thigh, lower leg and foot) and the strength of the muscles that are antagonists of anti-gravity muscles: the flexor muscles of the thigh, the muscles of the back of the thigh and also the muscles of the leg that extend the foot.*

**Key words:** *algorithm, force, muscle, joint.*

Стаття надійшла до редакції 10.09.2019 р.

Рецензент: доктор біологічних наук, професор Н. Б. Суворов