

Ю.П. Потехина

БИОМЕХАНИКА

Учебник

Министерство здравоохранения Российской Федерации

Рекомендовано Федеральным методическим центром по остеопатии в качестве учебника для использования в образовательных учреждениях, реализующих основные профессиональные образовательные программы высшего образования программы специалитета 31.05.04 «Остеопатия», ординатуры 31.08.52 «Остеопатия», программ профессиональной переподготовки и программ повышения квалификации врачей по специальности «Остеопатия»

Регистрационный номер рецензии 27 от 15 ноября 2022 года



Москва
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА
«ГЭОТАР-Медиа»
2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Введение	6
Глава 1. История развития биомеханики	9
1.1. Зарождение биомеханики как науки	9
1.2. Развитие методов исследования в биомеханике	12
1.3. Вклад российских ученых в развитие биомеханики	16
1.4. Связь остеопатии и биомеханики	19
Глава 2. Механические воздействия	25
2.1. Виды механических воздействий	25
2.2. Механические колебания и вибрация	30
2.3. Механические волны	38
Глава 3. Механические свойства твердых тел	46
3.1. Виды твердых тел	46
3.2. Деформации твердых тел	52
3.3. Виды деформаций	63
3.4. Механические свойства твердых тел	67
Глава 4. Механические свойства мягких биологических тканей	74
4.1. Разновидности соединительной ткани, ее состав и свойства ее элементов	76
4.2. Цитоскелет	86
4.3. Общие механические свойства мягких биологических тканей	89
4.4. Механические свойства кожи	93
4.5. Механические свойства нервной ткани	102
4.6. Механические свойства мышц	108
4.7. Механические свойства сухожилий	110
Глава 5. Механические свойства твердых биологических тканей	117
5.1. Механические свойства костей	118
5.2. Механические свойства хрящевой ткани	126
Глава 6. Механические свойства и работа сердца	137
6.1. Строение сердца	137
6.2. Сердечный цикл	143
6.3. Механические свойства сердца	146
6.4. Модели сердца и его структур	148
6.5. Особенности движения крови в сердце	155
Глава 7. Механические свойства сосудов	160
7.1. Строение и механические свойства артерий	160
7.2. Строение и механические свойства вен	171

7.3. Строение кровеносных и лимфатических капилляров	174
7.4. Строение и механические свойства лимфатических сосудов	175
Глава 8. Движение крови по сосудам	180
8.1. Вязкость жидкости	180
8.2. Реологические свойства крови	182
8.3. Течение вязкой жидкости по горизонтальной трубе	184
8.4. Движение крови в артериях и венах	188
8.5. Давление крови	192
8.6. Движение крови в капиллярах	195
Глава 9. Биомеханика дыхательной системы	200
9.1. Строение и механические свойства воздухоносных путей	200
9.2. Строение и механические свойства легочной паренхимы	202
9.3. Биомеханика внешнего дыхания	206
9.4. Движение воздуха по воздухоносным путям	211
9.5. Биомеханика кашля	215
Глава 10. Механика заменителей биологических тканей. Имплантация и эндопротезирование	220
10.1. Требования к материалам для эндопротезирования	221
10.2. Протезирование кровеносных сосудов	226
10.3. Протезирование суставов	229
Глава 11. Строение и механические свойства опорно-двигательного аппарата	236
11.1. Пассивная часть опорно-двигательного аппарата	236
11.2. Позвоночный столб	239
11.3. Активная часть опорно-двигательного аппарата	245
11.4. Вертикальная поза человека и положение общего центра тяжести	254
Глава 12. Опорно-двигательный аппарат как биомеханическая система	266
12.1. Кинематика опорно-двигательного аппарата	267
12.2. Звенья тела как рычаги	275
12.3. Динамика опорно-двигательного аппарата	282
12.4. Биомеханика ходьбы	297
Глава 13. Анатомо-функциональное единство опорно-двигательного аппарата	314
13.1. Опорно-двигательный аппарат как система тенсегрити	314
13.2. Реакции живых тканей на механические воздействия	322
13.3. Организация мышечно-фасциальной системы	326
Предметный указатель	338

Глава 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ БИОМЕХАНИКИ

1.1. ЗАРОЖДЕНИЕ БИОМЕХАНИКИ КАК НАУКИ

Биомеханика — одно из самых старых направлений естественных наук — биологии и физики. Ее истоками были работы Аристотеля и Галена, посвященные анализу движений животных и человека. **Аристотель** (384–322 гг. до н.э.) — выдающийся греческий ученый, предпринял первые попытки классификации движений животных и человека. Он пытался понять значение реакции опоры при ходьбе, считал целесообразным сгибание ноги в колене в фазу опоры, так как это позволяло уменьшить вертикальные колебания туловища. Аристотель может считаться первым биомехаником, так как написал трактаты «De Motu Animalium» — «Движения животных» и «On the Gait of Animals» — «Ходьба животных». Велик вклад в изучение функций организма человека Клавдия Галена (129–201 гг. н.э.) — анатома, врача и естествоиспытателя, который считается классиком античной медицины.

Однако только благодаря работам одного из самых блистательных людей эпохи Возрождения **Леонардо да Винчи** (рис. 1.1) биомеханика сделала свой следующий шаг, став экспериментальной наукой. Художник, инженер и ученый, Леонардо изучал строение человеческого тела в связи с движением. Он описал законы пропорций человеческого тела, механику тела при переходе из положения сидя к положению стоя, при ходьбе, прыжках и, по-видимому, впервые дал описание походок. Все его описания сопровождалось математическими расчетами, описанием собственных опытов, рисунками и чертежами (рис. 1.2).

Изучая ходьбу, бег и другие движения человека, Леонардо да Винчи высказал мысль о необходимости использования достижений механики для их исследования. Он писал: «Наука механика потому столь благоприятна и полезна более всех прочих наук, что, как оказывается,



Рис. 1.1. Леонардо да Винчи
(1452–1519)

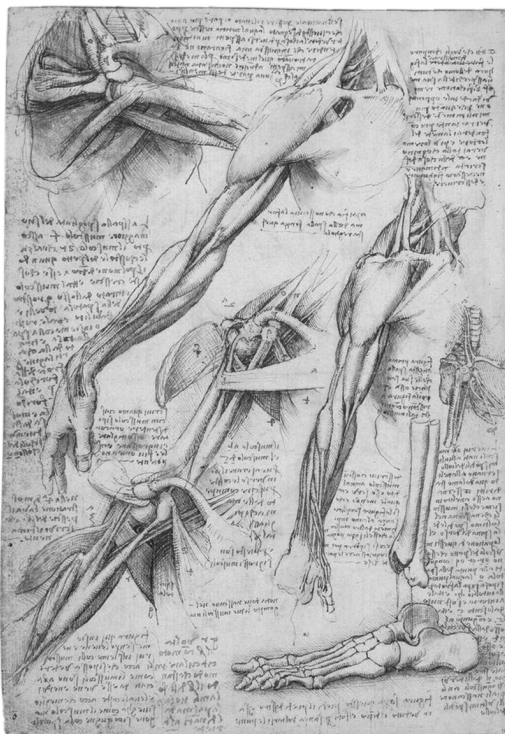


Рис. 1.2. Пример рисунка Леонардо да Винчи («Тетради по анатомии»)

все живые существа, имеющие способность к движению, действуют по ее законам». В анатомических исследованиях Леонардо да Винчи, обобщая результаты вскрытий, рассматривал организм как образец «природной механики». Леонардо да Винчи впервые описал функции некоторых костей и нервов, высказал новаторские предположения об антагонизме мышц.

Английский медик, анатом, основоположник физиологии и эмбриологии **Уильям Гарвей** (William Harvey, 1578–1657) занимался исследованиями кровообращения, и в 1628 г. опубликовал фундаментальный труд «*Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus*» («Анатомическое исследование о движении сердца и крови у животных»). В нем он впервые сформулировал свою теорию кровообращения и привел экспериментальные доказательства в ее пользу. Измерив величину систолического объема, частоту сокращений сердца и общее количество крови в теле овцы, Гарвей доказал, что за 2 мин вся кровь должна

пройти через сердце, а в течение 30 мин через него проходит количество крови, равное массе тела животного. Отсюда следовало, что, вопреки утверждениям Галена о поступлении к сердцу все новых и новых потоков крови от вырабатывающих ее органов, кровь возвращается к сердцу по замкнутому циклу. Замкнутость же цикла обеспечивают мельчайшие трубочки — капилляры, соединяющие артерии и вены.

Гарвей был последователем *ятрофизики* (от др.-греч. ἰατρός — «врач» и «физика») — направления медицины, сводившего функционирование живого организма, как больного, так и здорового, к законам физики (в первую очередь к законам механики). Лечение болезни при ятрофизическом подходе представлялось прежде всего как ремонт механизма. Итальянский медик **Джорджо Бальиви** (1668–1707), к примеру, рассматривал человеческую руку как рычаг, грудную клетку — как кузнечный мех, а сердце — как насос. Подобных взглядов придерживался шведский профессор медицины **Ларс Руберг** (1664–1742), который исходил из того, что «человек есть машина» (лат. *homo machina est*): «человеческое сердце — насос, легкие — кузнечный мех, живот — корыто». Ятрофизика была распространена в XVI–XVIII вв., ее идеи развивали многие естествоиспытатели, в том числе Джованни Борелли, Андреас Везалий, Рене Декарт, Бернардино Рамаццини. На определенном этапе ятрофизика сыграла положительную роль в развитии медицины, поставив ее на естественно-научную основу.

Большое влияние на развитие биомеханики оказал итальянец **Джованни Альфонсо Борелли** (рис. 1.3) — врач, математик, физик. Своей книгой «О движении животных» он, по сути, положил начало биомеханике как отрасли науки. Он рассматривал организм человека как машину и стремился объяснить дыхание, движение крови и работу мышц с позиций механики. Борелли изучал с точки зрения механики условия равновесия человеческого тела, дал определение общего центра тяжести (ОЦТ) на основе экспериментальных данных (рис. 1.4).

Выдающийся математик, физик, механик и астроном **Леонард Эйлер** (1707–1783), работая в Петербургском университете, написал первый в мире учебник теоретической механики, а также курс математической навигации и многие другие труды. В частности, он провел математическое исследование движения крови в сосудах.

Последующее развитие биомеханики как науки связано с трудами немецких ученых — братьев **Эдуарда** и **Вильгельма Веберов**. Эдуард Вебер был анатомом, а Вильгельм — физиком. В 1836 г. они издали книгу «*Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge*» («Механика ходьбы

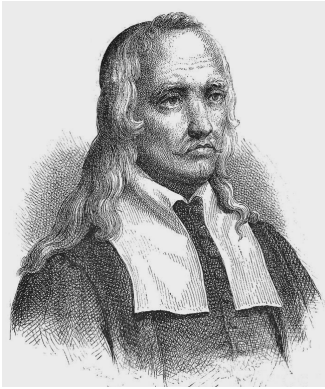


Рис. 1.3. Джованни Альфонсо Борелли (1608–1679)

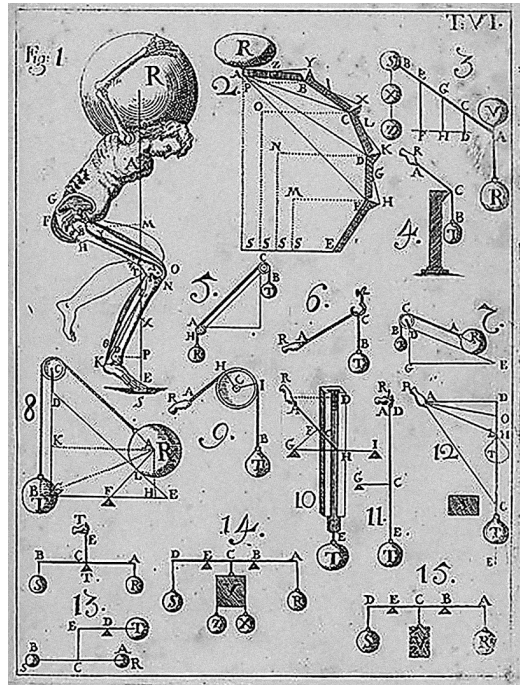


Рис. 1.4. Пример рисунка Джованни Альфонсо Борелли

человека»). В этой книге они привели данные о кинематических характеристиках ходьбы человека. Однако несовершенство используемых методик не позволило провести анализ быстротекущих двигательных действий. В биомеханике мышц до сих пор справедлив принцип, впервые сформулированный Э. Вебером: «Сила мышц, при прочих равных условиях, пропорциональна ее поперечному сечению».

1.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В БИОМЕХАНИКЕ

В конце XIX в. стало ясно, что дальнейшее развитие биомеханики требует применения не только высокоточных, но и комплексных методов исследования.

В 1877 г. американский фотограф **Эдвард Майбридж** (1830–1904), пытаясь разрешить спор о положении лошади во время быстрого бега, поставил в ряд 12 фотокамер, а вдоль беговой дорожки натянул тонкие нити.

Лошадь при беге обрывала нити и спускала затвор камеры. Результатом стали серии фотографий, показывающих точное положение лошади в различные моменты времени. В 1887 г. Эдвард Майбридж опубликовал труд «Движения животных: электрофотографическое исследование последовательных фаз движений животных. 1872–1885», в котором представил более 20 тыс. снимков различных движений человека и животных (рис. 1.5).

Дальнейший шаг по внедрению научных методов исследования в биомеханику был сделан французским физиологом, изобретателем и фотографом **Этьеном-Жюлем Мареем** (Étienne-Jules Marey, 1830–1904). Э.-Ж. Марей разработал метод *пневмографии* — записи опорных реакций с помощью передачи давления воздуха. В подошвы ботинка человека встраивались воздушные камеры. Во время опоры давление воздуха в камере повышалось, оно передавалось по трубочкам на прибор, который испытуемый держал в руке. Это позволило определить длительность периодов опоры и полета при ходьбе и беге. Кроме этого, Э.-Ж. Марей сконструировал сфигмограф, кардиограф оригинальной конструкции, хронограф и др. Он усовершенствовал метод Майбриджа, предложив фотографическое ружье, которое позволяло производить один за другим 12 снимков. С помощью «ружья» он снимал и изучал полет птиц и насекомых, ходьбу, бег, прыжки человека. В 1880 г. Э.-Ж. Марей изобрел *хронофотографию* — фотографирование всего движения на одну пластинку. Для того чтобы это сделать, перед фотоаппаратом устанавливали вращающийся диск с прорезями. Когда прорезь открывает доступы светового потока к объективу, на пластине фиксируется положение человека. В результате съемки на одной пластине получается ряд положений человека в последовательные моменты времени. Первые хронофотографии были очень плохого качества. В дальнейшем

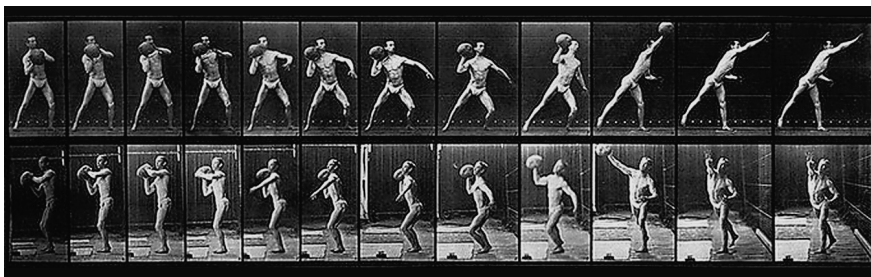


Рис. 1.5. Пример серии фотографий Эдварда Майбриджа

Э.-Ж. Марей ограничил число заснимаемых точек движущегося объекта. Он одел человека с головы до ног в черное трико и на голову набросил капюшон. Из всей поверхности тела он оставил светлыми только узенькие полоски вдоль осей звеньев конечностей, да голову отметил светлой точкой. Полоски были сделаны из серебристой галунной тесьмы. Теперь на его фотографиях стали появляться палочковые схемы — «человечки из спичек» (рис. 1.6). Благодаря узости этих «спичек» он мог снимать фазы движения гораздо более часто, не боясь, что одна фигура наложится на другую. Следующий шаг вперед был связан с заменой светящихся полосок яркими маркерами, которые крепились на центры суставов. Хронофотография уступила место циклографии. Э.-Ж. Марей также одним из первых сумел синхронизировать две экспериментальные методики, сопоставив опорную реакцию в фазе отталкивания в ходьбе с хронофотографией.

В конце XIX в. немецкие ученые **Вильгельм Брауне** и **Отто Фишер** (V. Braune, O. Fischer) опытным путем (на нескольких замороженных трупах) определили относительный вес отдельных частей тела человека (головы, туловища, плеча, предплечья и т.д.), а также положение центров тяжести звеньев тела. С помощью собственной методики регистрации движений они детально изучили динамическую сторону перемещений конечностей и ОЦТ человека при нормальной ходьбе.

Большой вклад в изучение механизмов мышечного сокращения внес английский физиолог **Арчибалд Вивиен Хилл** (1886–1977). В 1923 г. он получил Нобелевскую премию по физиологии и медицине «За открытия в области теплообразования в мышце». Будучи по образованию математиком (окончил Кембриджский университет), Арчибалд Хилл предложил описание зависимости скорости укорочения мышцы от значений внешней нагрузки (характеристическое уравнение Хилла).

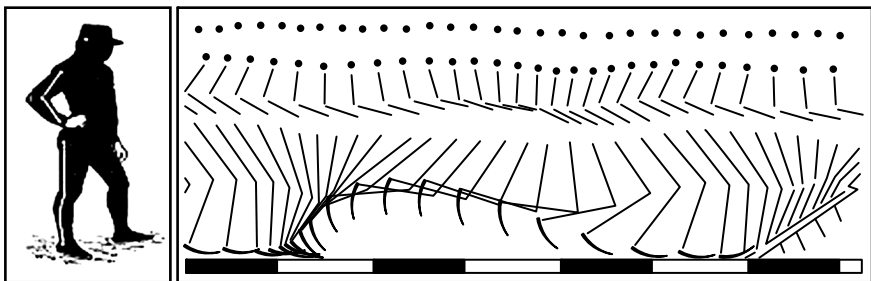


Рис. 1.6. Пример хронофотографии Этьена-Жюля Марей

Американские специалисты E.W. Schrader и др. (1964) создали протез ноги, ампутированной выше колена. Была изготовлена гидравлическая модель коленного сустава, позволяющая добиться естественной ходьбы. Конструкция предусматривала нормальную высоту подъема пятки и вытягивание ноги при ее отводе независимо от скорости ходьбы.

В 1971 г. было организовано *Международное общество биомеханики* (ISB, International Society of Biomechanics, <https://isbweb.org/>, рис. 1.7). ISB способствует изучению всех областей биомеханики на международном уровне, хотя особое внимание уделяется биомеханике движения человека. Общество поощряет международные контакты между учеными, способствует распространению знаний и налаживает связи с национальными организациями. На конгрессе ISB каждые два года вручается премия Мейбриджа. В состав общества входят ученые из различных дисциплин, включая анатомию, физиологию, инженерию (механику, аэрокосмическую промышленность и т.д.), ортопедию, реабилитационную медицину, спортивную науку и медицину, эргономику, электрофизиологическую кинезиологию и др.

The image shows the official website of the International Society of Biomechanics (ISB). At the top left is the ISB logo, which consists of a stylized figure with arms and legs raised, forming a circle. To the right of the logo is the text "International Society of Biomechanics". Further right is the logo for "DELAYS" (Wearable Sensors for Movement Sciences), with "Gold sponsor" written above it. On the top right, there is a "MEMBERS LOGIN" section with input fields for "Username" and "Password", a "Remember Me" checkbox, and buttons for "Log in", "Forgot your username?", and "Forgot your password?". Below the login section is a navigation menu with links for "Home", "About Us", "News", "Events", "Activities", "Members", "Students", and "Resources". A search bar is located to the right of the navigation menu. The main content area is divided into several sections: a "WELCOME" message stating "The ISB promotes the study of all areas of Biomechanics at the International level.", a "FINITE ELEMENT ANALYSIS" article featuring images of an Achilles Tendon and a Hip Joint, with text "Courtesy Vickie Shim, Justin Fernandez and Thor Besier, University of Auckland", and a "Latest News" section. The "Latest News" section includes a "BOOM: Biomechanics podcast" with a link to "Student Voices Episode 30: Who Are You in Your Heart?" and a "NBD Outreach for Women in Biomechanics" section with the text "Hello Friends and Colleagues.". On the right side of the main content area, there is a "STAY IN TOUCH" section with social media icons for Facebook, Twitter, LinkedIn, and YouTube, and text for "Biomech-L", "ISB NOW", and "Facebook Student group".

Рис. 1.7. Официальный сайт Международного общества биомеханики

В конце XX в. в биомеханику начали внедрять информационные технологии. Широкое распространение получили *программно-аппаратные комплексы* (ПАК), позволяющие в режиме реального времени обрабатывать данные, поступающие в компьютер. В компьютер одновременно может поступать информация с видеокамер и различных датчиков, после ее обработки результаты представляются в табличном и графическом видах.

В настоящее время активно развивается направление под названием *компьютерное моделирование*, позволяющее создавать различные варианты движений на основе знаний законов биомеханики, структуры двигательных действий и имеющихся данных о биомеханических характеристиках тканей.

1.3. ВКЛАД РОССИЙСКИХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИЕ БИОМЕХАНИКИ

Петр Францевич Лесгафт (рис. 1.8) фактически создал биомеханику физических упражнений, разработанную на основе динамической анатомии. В 1877 г. П.Ф. Лесгафт начал читать лекции по этому предмету на курсах по физическому воспитанию. В своем труде «Основы теоретической анатомии», первое издание которого датируется 1892 г., П.Ф. Лесгафт рассмотрел ряд проблем, смежных с биомеханикой: меха-

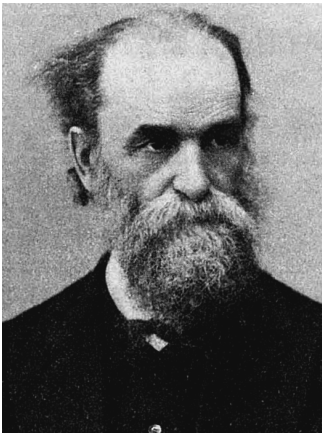


Рис. 1.8. П.Ф. Лесгафт (1837–1909)

нические свойства биологических тканей; особенности строения и соединения костей в зависимости от действующих на них сил; особенности функционирования перистых мышц; морфометрические характеристики мышц (длина волокна, площадь поверхности опоры, расстояние от места прикрепления мышцы до оси вращения в зависимости от противодействия внешним силам и функции в организме). На основе анализа морфометрических характеристик мышц П.Ф. Лесгафт предложил новую классификацию скелетных мышц на сильные и ловкие. В г. Санкт-Петербурге он основал высшее учебное заведение, которое носит теперь его имя — Институт

физического образования, а ныне Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта. В институте в 1927 г. был выделен самостоятельный предмет под названием «Теория движения», а в 1931 г. переименован в курс «Биомеханика физических упражнений».

Иван Михайлович Сеченов (рис. 1.9) — известный русский физиолог, окончил медицинский факультет Московского университета, получил также хорошее техническое образование в артиллерийском училище. Это позволило ему, кроме исследований по физиологии, внести солидный вклад в биомеханику движений человека. В 1901 г. он издал книгу «Очерк рабочих движений человека», в которой подробно рассмотрел следующие вопросы: работу ОДА как рабочей машины (формы суставов, плечи сил тяги мышц); механику мышечного сокращения (факторы, определяющие силу мышцы); биомеханические свойства мышцы; функции верхней и нижней конечностей человека как рабочей машины. Кроме этого, детальному биомеханическому анализу были подвергнуты некоторые физические упражнения: сгибание рук в висе, присед и вставание на одной ноге «пистолет» (рис. 1.10).

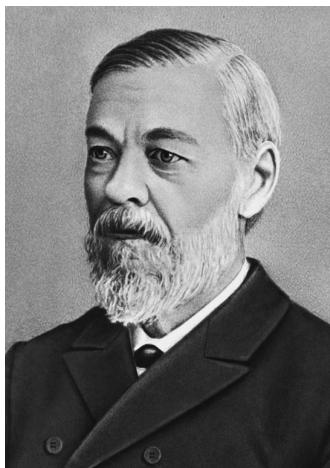


Рис. 1.9. И.М. Сеченов (1829–1905)

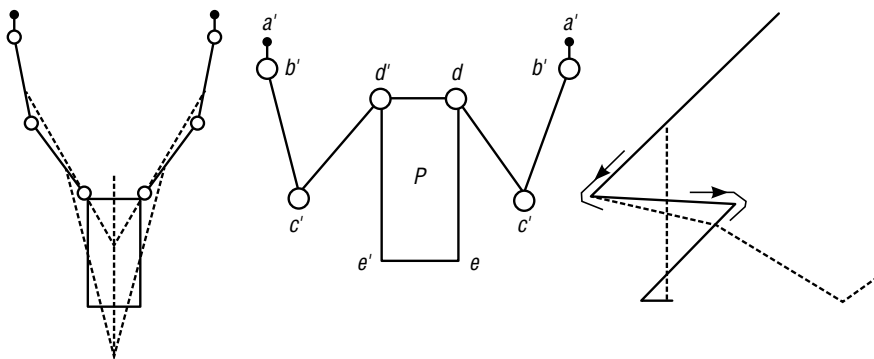


Рис. 1.10. Чертежи И.М. Сеченова



Рис. 1.11. А.А. Ухтомский (1875–1942)



Рис. 1.12. Н.А. Бернштейн (1896–1966)

Значительную роль в развитии биомеханики сыграла книга профессора Ленинградского университета, академика **Алексея Алексеевича Ухтомского** (рис. 1.11) «Физиология двигательного аппарата», изданная в 1927 г. В этой книге А.А. Ухтомский подробно рассмотрел механические свойства мышц, а также зависимость силы мышцы от анатомических и физиологических факторов. В частности, он показал, что сила мышцы при прочих равных условиях прямо зависит от ее поперечного сечения. В отдельный раздел вынесены вопросы биомеханики ОДА. Звенья ОДА человека рассмотрены с позиций теории машин и механизмов — как рычаги первого, второго и третьего рода. Соединение звеньев ОДА человека представлено в виде кинематических пар и цепей. Даны классификация суставов по степеням свободы и формула расчета степеней свободы. Одним из первых А.А. Ухтомский высказал мысль о том, что управление движениями есть устранение избыточных степеней свободы. Пытаясь обозначить предмет биомеханики как науки, он указывал: «Биомеханика изучает ту же систему нервно-мышечных приборов как рабочую машину, то есть задается вопросом, каким образом полученная механическая энергия движения и напряжения может приобрести определенное рабочее применение».

Николай Александрович Бернштейн (рис. 1.12) — выдающийся русский физиолог и биомеханик, много времени посвятил изучению биомеханики спортивных и трудовых движений. В начале 20-х годов XX в. он, используя методику *циклобъемки*, получил огромный фактологический материал по

кинематике и динамике ходьбы, бега и прыжка. Полученные результаты Н.А. Бернштейн обобщил в книге «Исследования по биодинамике ходьбы, бега и прыжка», которая была опубликована в 1940 г. Понимая недостаточность информации, получаемой от циклографической методики, Н.А. Бернштейн придавал большое значение *электромиографии* — методике регистрации биопотенциалов мышц. Всемирную славу Н.А. Бернштейну принес труд «О построении движений», вышедший в свет в 1947 г. В этом исследовании Н.А. Бернштейн по-новому рассмотрел вопросы управления двигательными действиями, формирования двигательных навыков, а также онтогенез моторики. Идеи Бернштейна нашли широкое практическое применение при восстановлении движений у раненых во время Великой Отечественной войны и в последующий период, при формировании спортивных навыков, создании различных кибернетических устройств и др.

Михаил Федорович Иваницкий (1895–1969) разработал функциональную (динамическую) анатомию применительно к задачам физкультуры и спорта, то есть определил связь анатомии с физкультурой. В 1928 г. он завершил фундаментальное исследование «О положении общего центра тяжести человеческого тела» и опубликовал первый оригинальный учебник «Записки по динамической анатомии», послуживший основой для книги «Движения человеческого тела» (1938). М.Ф. Иваницкий с сотрудниками провел ряд исследований, посвященных динамике движений, анализу кинетики различных звеньев ОДА при ходьбе, беге, прыжках сальто, плавании и других движениях, а также анализу различных положений тела (вис, мост, упор).

1.4. СВЯЗЬ ОСТЕПАТИИ И БИОМЕХАНИКИ

Родоначальник остеопатии **Эндрю Тейлор Стилл** (1828–1917) не получил регулярного образования и был в значительной степени самоучкой. Начав изучать механику в 1855 г., Стилл интересовался ею всю жизнь. В своем большом фермерском хозяйстве он применял машины, не только им изобретенные, но и собственноручно собранные: он изобрел маслобойку и усовершенствовал жатку. Он много размышлял о механическом аспекте в человеческом теле и пришел к выводу, что человек — это машина. В то же время он наделял эту машину интеллектом, разумом, духом и душой. Многие современники Стилла считали, что человек сотворен наподобие машины. В отличие от них Стилл утверждал, что все машины, изобретенные человечеством, — это жалкие копии живой совершенной человеческой машины.