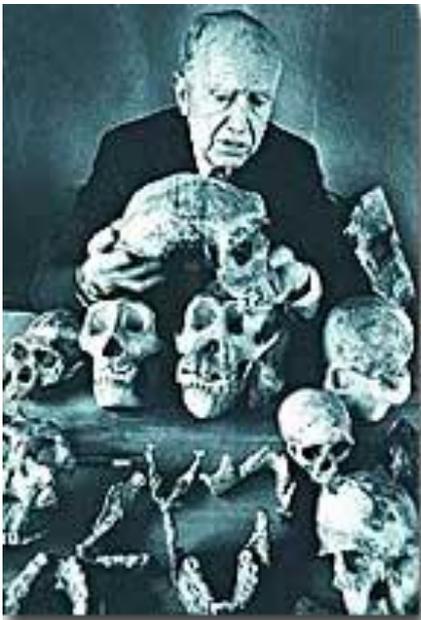


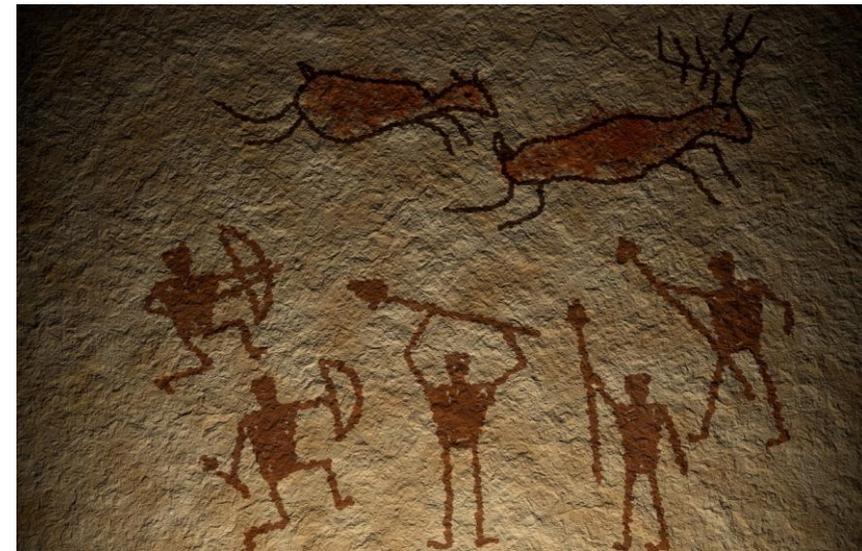
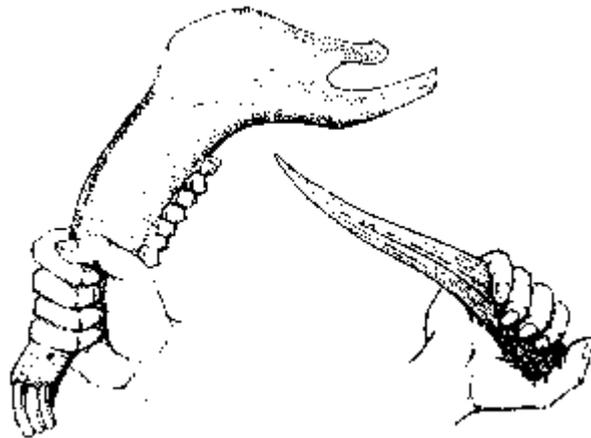
# Начала Российской Биомеханики

Демидова И.И.

Биомеханика — это наука о состоянии биоконструкций с точки зрения законов механики.



R.H.Dart (1925)



Наскальная живопись бушменов. Неолит.

**Понятие прочности, твердости** было известно людям с давних времен. Антропологи считают, что первой культурой была культура **остео-одонто-кератическая** культура, поскольку кости и зубы были первыми орудиями труда и защиты.

Для исследования биоконструкций применяется системный анализ:

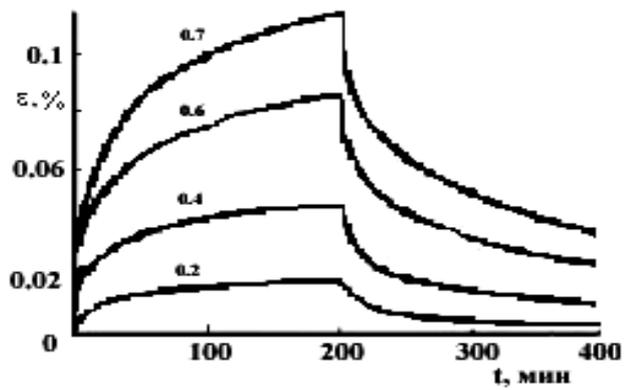
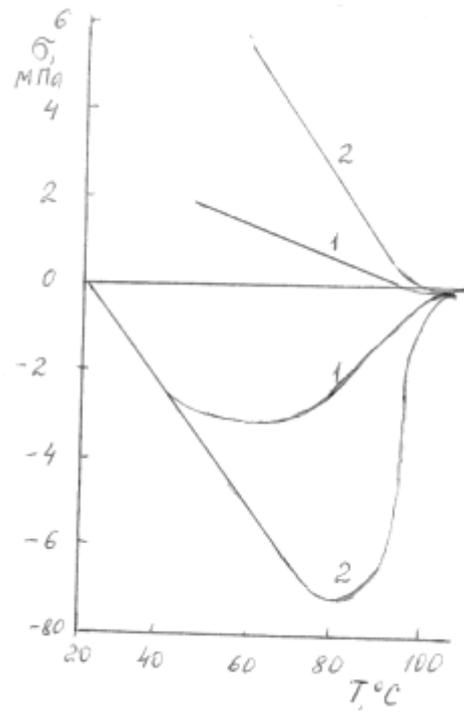
1. рассматривается конструкция и её составные части;
2. определяются свойства тканей конструкции;
3. выявляются внешние и внутренние воздействия на конструкцию..

$$\alpha_k = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k-1}, \beta_k, t)$$

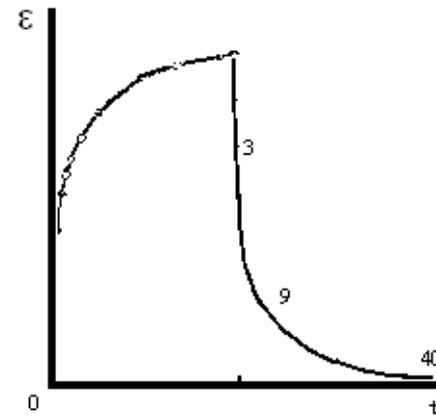
$$** (* [ \quad ] * ) **$$

$$E = (0.28 - 8) 10^3 \text{ МПа}$$

$$p_0 = f(p_a, p_s, p_b, \dots), \quad p_i = f(p_{p/k}, p_{лк}, p_{ск}, \dots)$$



Кость



ЭД-6

# Истоки биомеханики

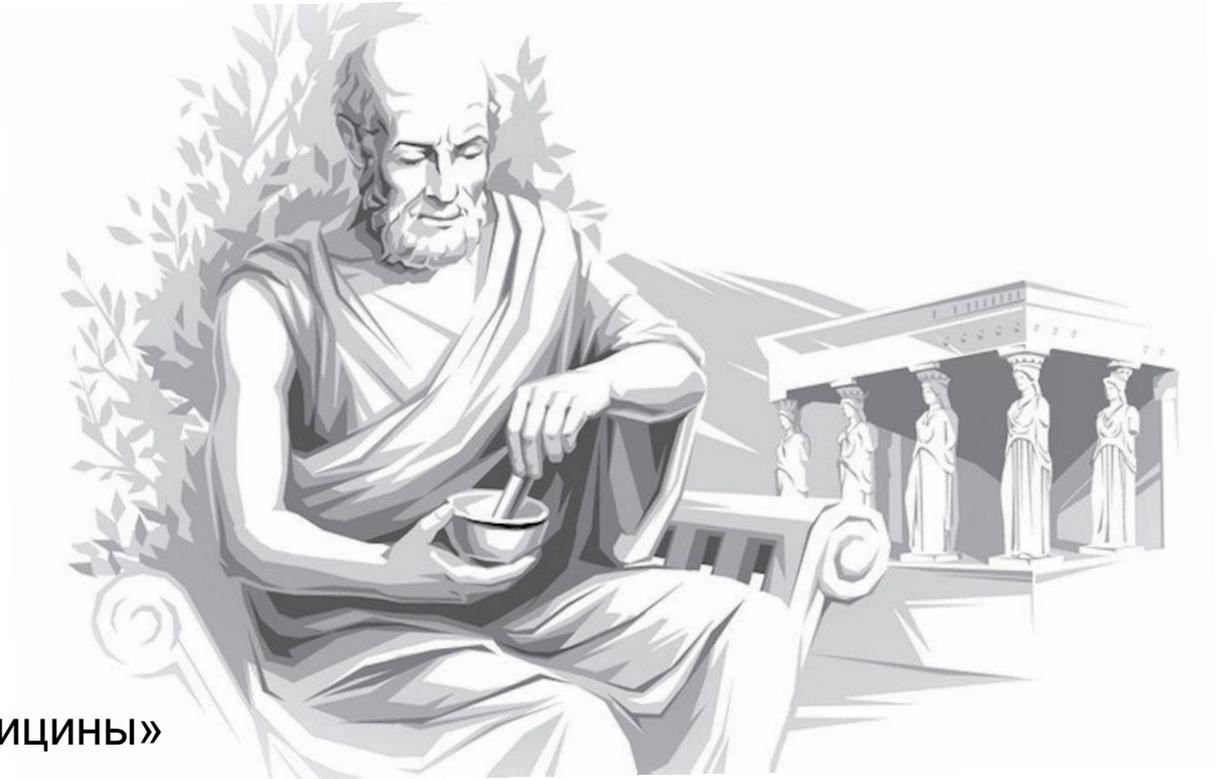
Исследователи прошлых лет пытались понять устройство и функционирование биоконструкций.

Гиппократ

(460 – 377 до н.э.),

древнегреческий целитель,  
врач и философ.

Вошел в историю как «отец медицины»



Учение Гиппократа состояло в том, что заболевание является не наказанием богов, а последствием природных факторов, нарушения питания, привычек и характера жизни человека.

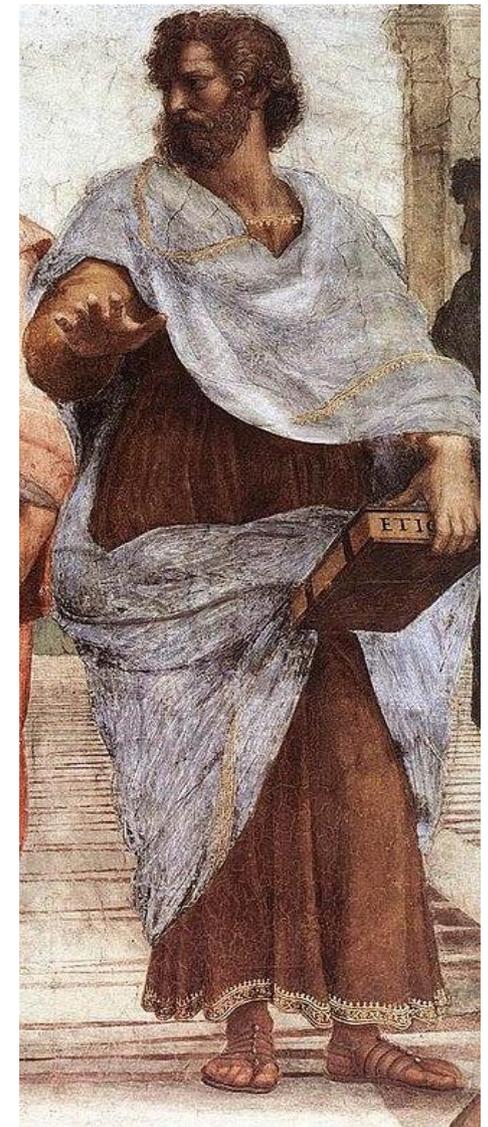
Аристотель (384–322 до н.э. )

Древнегреческий философ

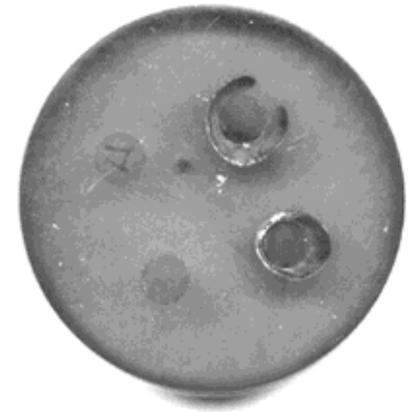
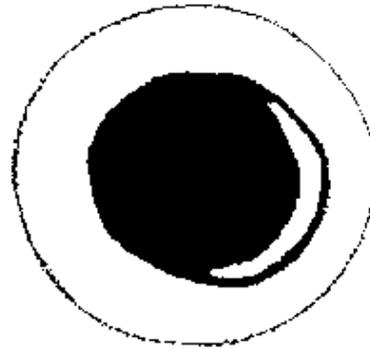
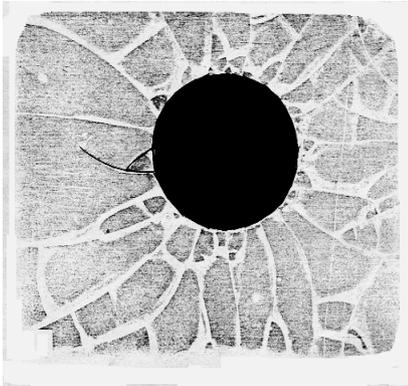
На возникновение биомеханики решающее влияние оказало развитие механики. В античные времена началось изучение движений человека. Аристотель первым ввел термин «механика», описал рычаг и другие простейшие машины, пытался путем рассуждений найти причины движений.

«De Motu Animalium» – «Движения животных».

Аристотель кисти Рафаэля



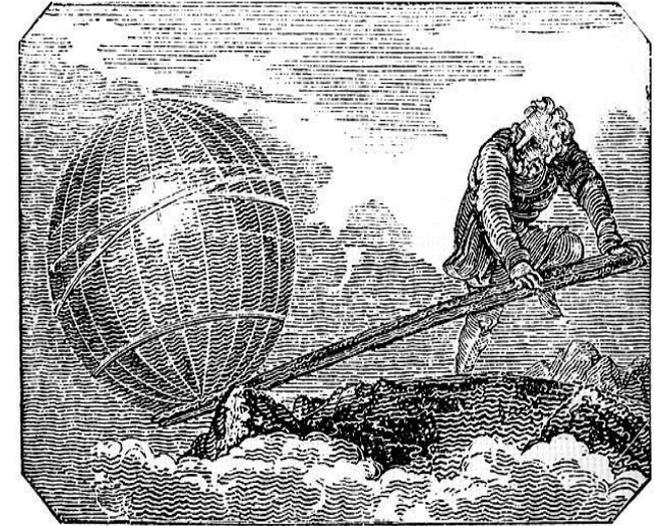
[https://ru.wikipedia.org/wiki/...Aristotle\\_by\\_Raphael.jpg](https://ru.wikipedia.org/wiki/...Aristotle_by_Raphael.jpg)



***"Правильно в философии рассматривать сходство  
даже в вещах, далеко отстоящих друг от друга"  
Аристотель (384-322 до н. э.)***



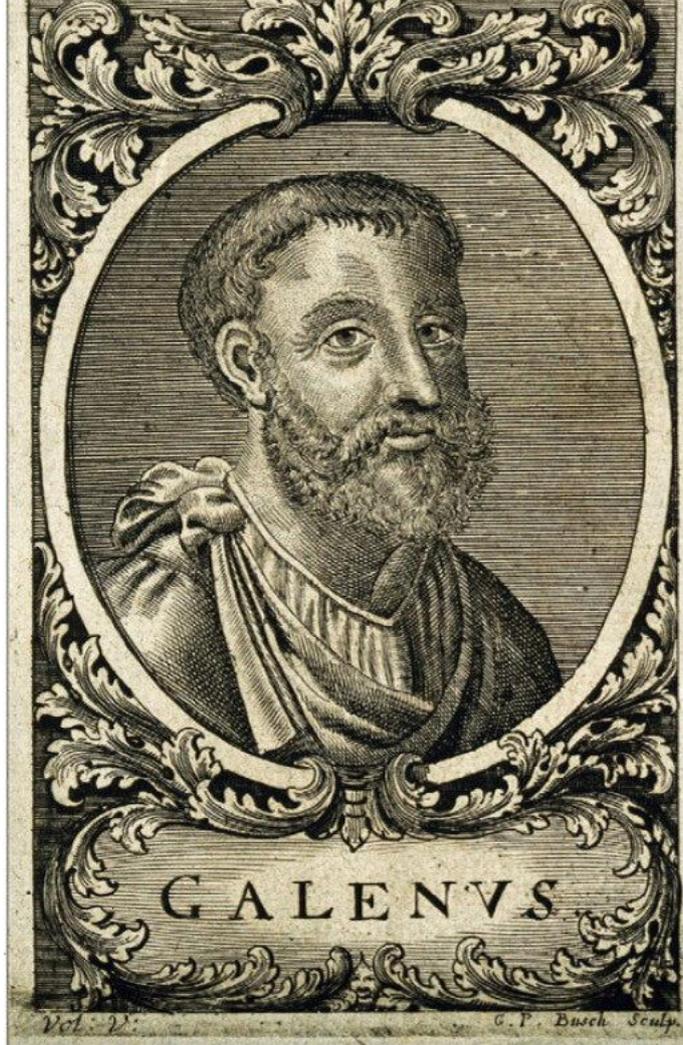
Архимед (287—212 гг. до н. э.)



«Архимед переворачивает Землю»

Гравюра 1824 года

Древнегреческий математик, физик, механик и инженер заложил основы статики и гидродинамики как точных наук. В течение многих веков основой механики была изложенная в труде Архимеда «О равновесии плоских фигур», теория рычага.



Гален (129– 216),

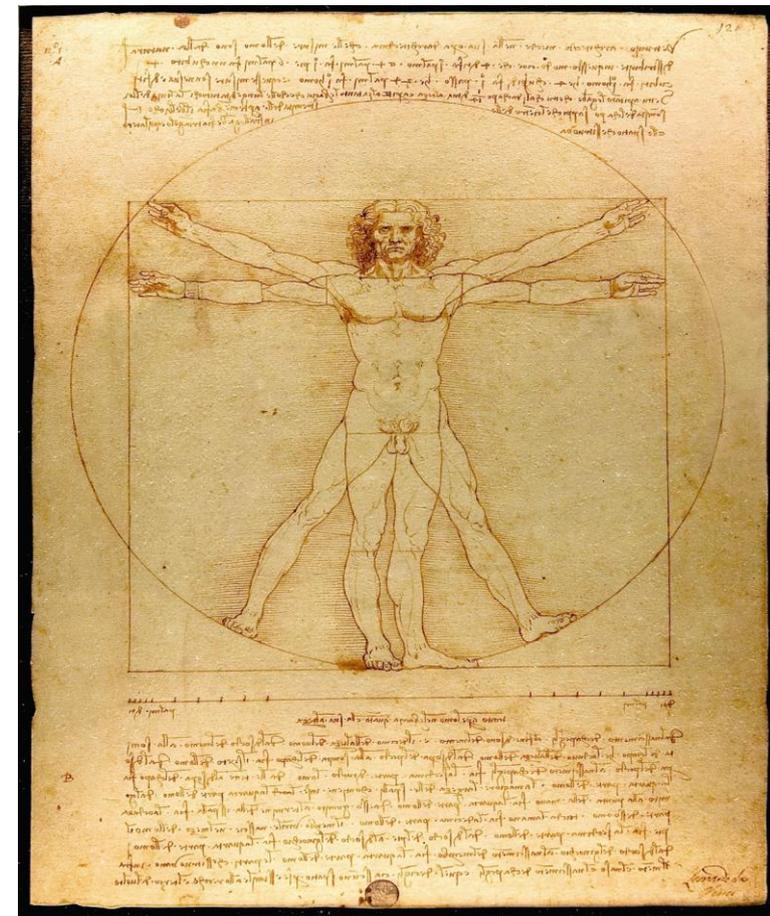
древнеримский медик, хирург и философ греческого происхождения.

В общей совокупности частей, все находится во взаимном согласии и ... все содействует деятельности каждой из них».

Он считал, что мозг является средоточием движения, чувствительности и душевной деятельности.



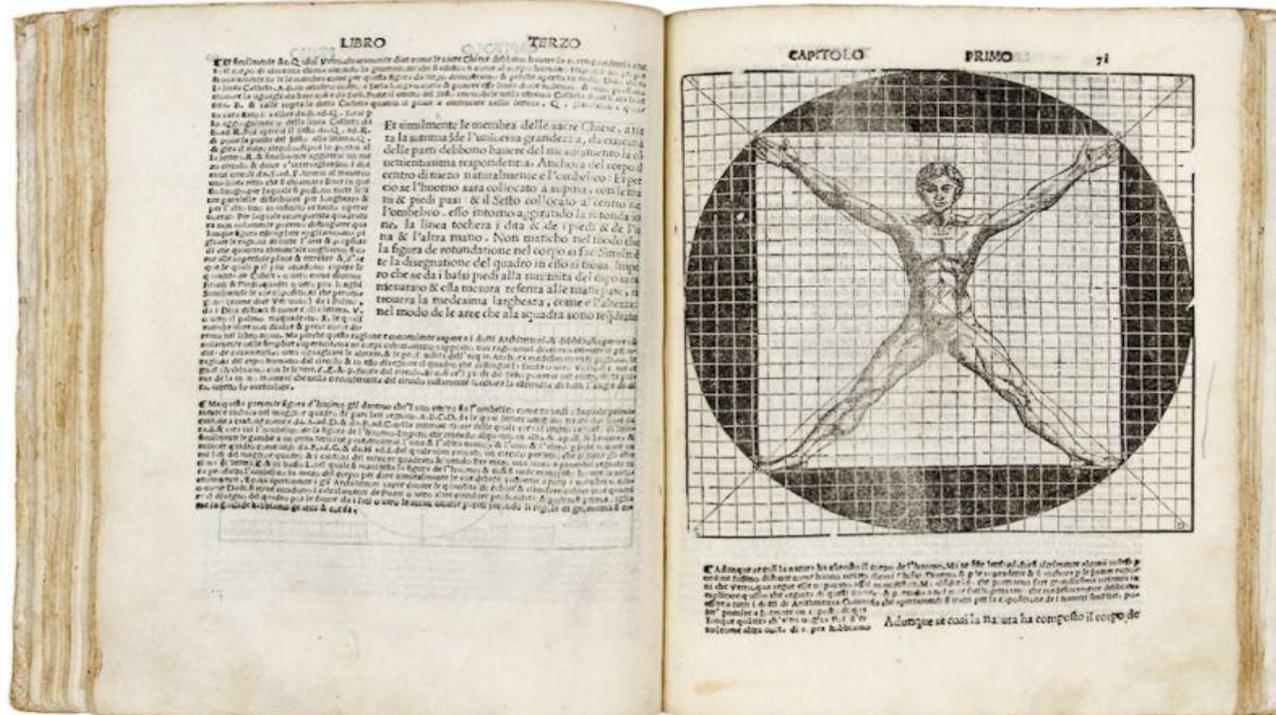
Leonardo da Vinci  
( 1452 - 1519 )



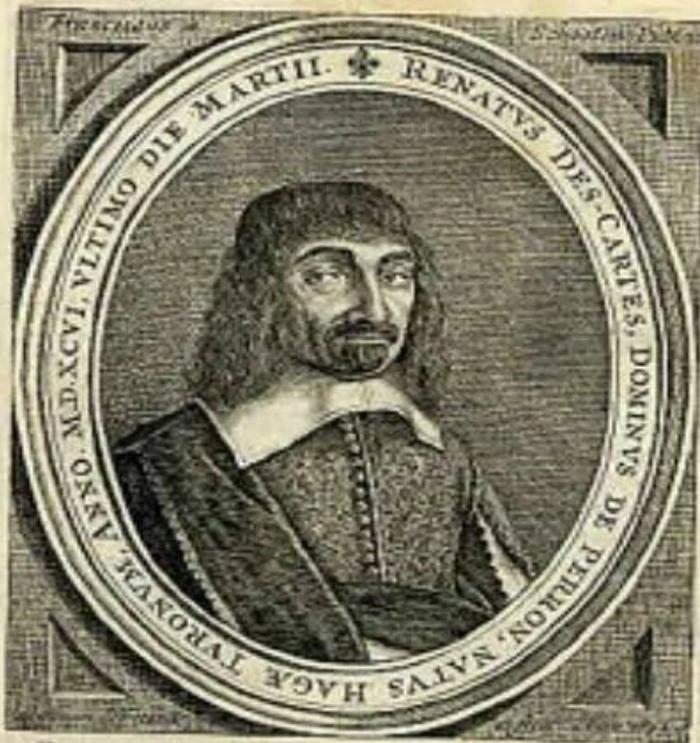
Витрувианский человек

Леонардо да Винчи придавал особое значение точным наукам в изучении функций человека. «Пусть не читает меня в основах моих тот, кто не математик» — писал он. Изучая ходьбу, бег и другие движения человека, Леонардо да Винчи высказал мысль о необходимости использования достижений механики для их исследования. Ему принадлежит высказывание: **«Наука механика потому столь благородна и полезна более всех прочих наук, что, как оказывается, все живые существа, имеющие способность к движению, действуют по ее законам».**

В основу всего, в том числе самого познания, он ставил такую науку, как математика: **«...ни одно человеческое исследование не может назваться истинной наукой, если оно не прошло через математические доказательства».**



В трактате об архитектуре Витрувий (80 до н.э.-- 15 до н.э.) вывел формулу «Прочность-Польза-Красота» (лат. «Firmitas-Utilitas–Venustas»), ставшую золотым правилом архитектуры.



*Primus inaccessum qui per tot secula verum  
Eruit è tetrâ longæ caliginis umbris.  
Mysticæ sagax, Naturæ tuus, sic cernitur Orbi  
Cartesius. Voluit sacros in imagine vultus  
Iungere victuræ artificis pia dextera fœdus,  
Optima ut aspicerent quem secula nulla tacebunt:  
CONSVANTISSI IVGVMINI F. 2<sup>a</sup>*

RENATI  
DESCARTES  
PRINCIPIA  
PHILOSOPHIÆ.

*Vltima Editio cum optima collata, diligenter  
recognita, & mendis expurgata.*



AMSTELÆDAMI,  
Apud DANIELEM ELZEVIIVM.  
ANNO CLÆ IDC LXXV.  
Cum Privilegio.

Рене Декарт (1596—1650).

Основными видами движения Декарт считал движение по инерции, которое сформулировал (1644) так же, как позднее Ньютон, и материальные вихри, возникающие при взаимодействии одной материи с другой. Взаимодействие он рассматривал чисто механически, как соударение. Декарт ввел понятие количества движения, сформулировал (в нестрогой формулировке) закон сохранения движения (количества движения), однако толковал его неточно, не учитывая, что количество движения является векторной величиной (1664).

Декарт выделил обширный класс невидимых тонких материй, с помощью которых пытался объяснить действие теплоты, тяготения, электричества и магнетизма.

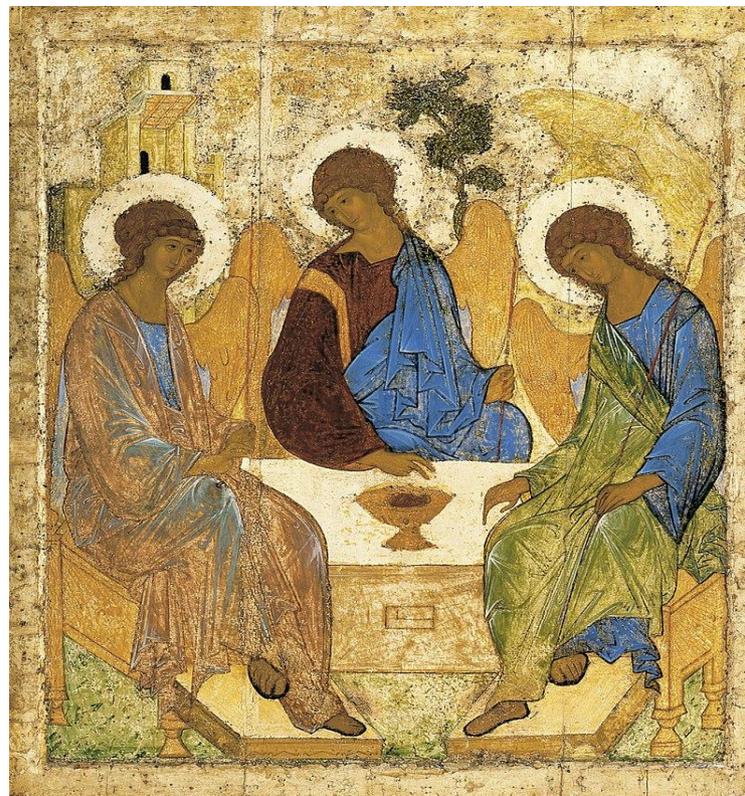


Кушанская монета

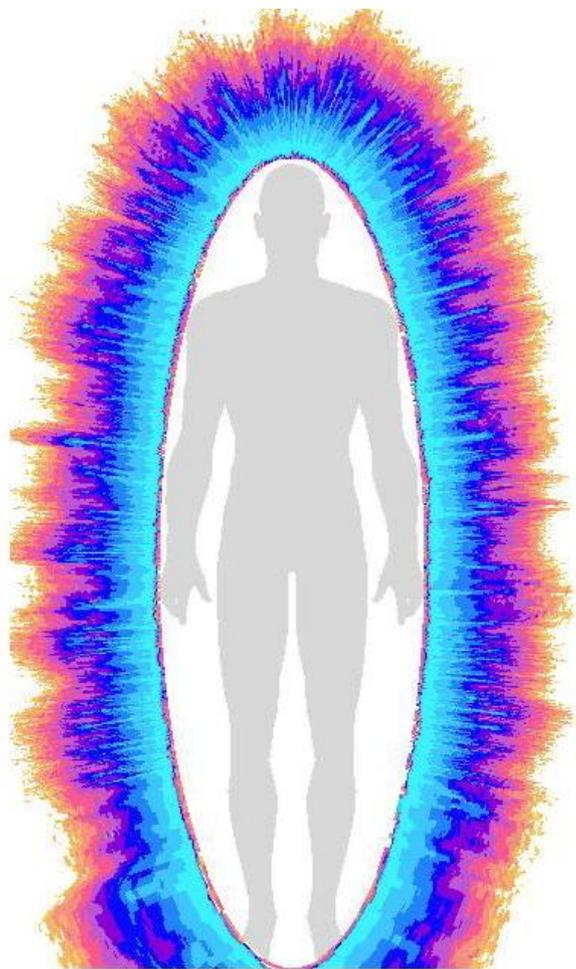
Будда с надписью

греческими  
буквами «БОДДО»

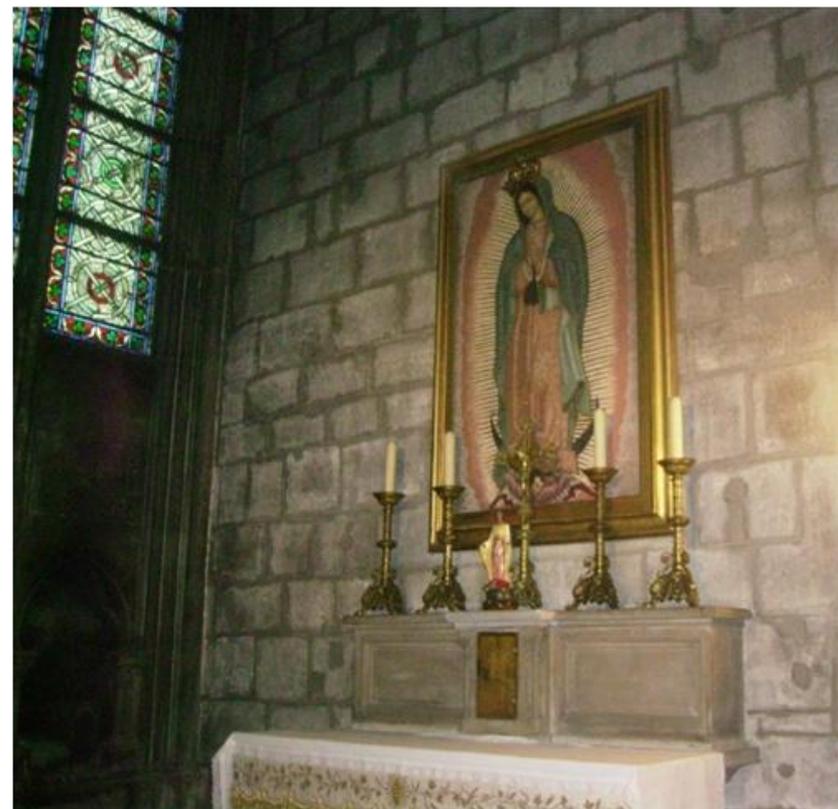
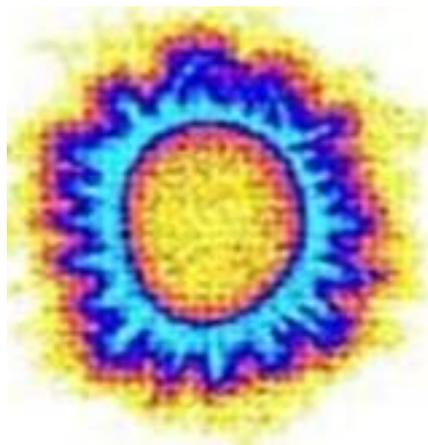
I век до н. э



«Троица»  
Андрей Рублёв, XV век



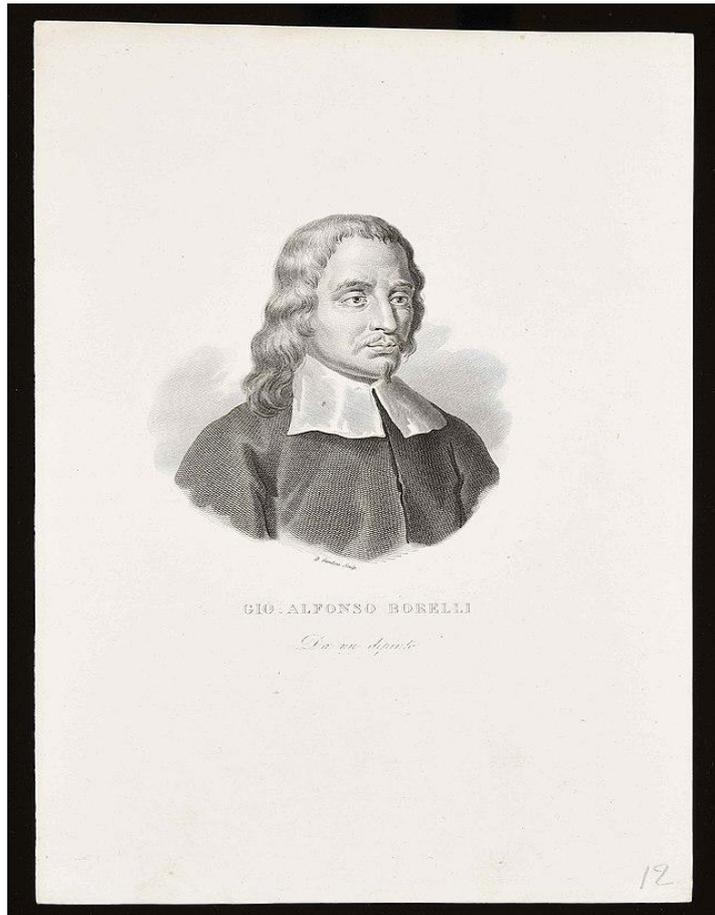
Subject 1, Capture 1 (no filter)



Метод газоразрядной визуализации (ГРВ) — это компьютерная регистрация и анализ газоразрядного свечения (ГРВ-грамм) любых биологических объектов, помещенных в электромагнитное поле высокой напряженности

Собор Нотр - Дам де Пари

Икона Святая Мария Гваделупская



Джованни Альфонсо Борелли (1608 — 1679)  
— итальянский учёный-универсал времени  
Научной революции XVII века.

Следует отметить, что математический аппарат того времени более всего был приспособлен для изучения статических положений человека.

Борелли считается основоположником биомеханики. Его двухтомный труд «О движении животных» (лат. *De Motu Animalium*) рассматривает организм животного с точки зрения математической теории механизмов. Особенно подробно он исследовал работу мускулов. Например, сердце он рассматривал как насос с клапанами, легкие — как два меха, а процесс ходьбы — как целенаправленное перемещение центра тяжести, сопровождаемое мерами по восстановлению равновесия.



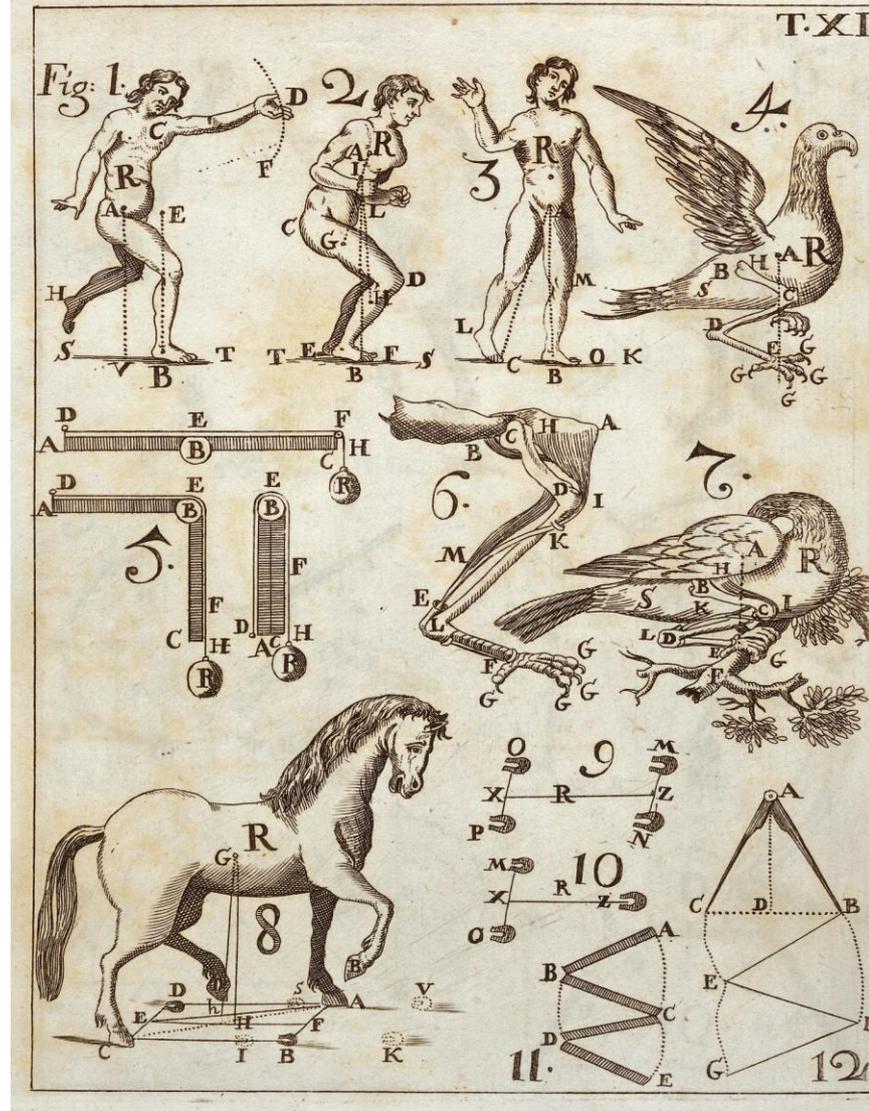
JOH. ALPHONSI BORELLI  
Neapolitani Matheseos Professoris  
DE  
**MOTU  
ANIMALIUM**  
PARS PRIMA.  
EDITIO NOVISSIMA,  
*Ab innumeris mendis & erroribus repurgata.*  
Addita sunt post finem Partis Secundae  
JOHANNIS BERNOULLII  
*Inst. Med. Diss.*  
Meditationes Mathematicae  
**DE MOTU MUSCULORUM.**



LUGDUNI BATAVORUM,  
Apud **PETRUM VANDER Aa.** Bibliopolam.  
ANNO M DCC X.

Борелли исследовал как статику, так и динамику тела, оценил силу, развиваемую мускулами при разных видах активности (ходьба, бег, прыжки, поднятие тяжестей). Он рассмотрел также полёт птиц, плавание рыб и скольжение червей. Эта работа неоднократно переиздавалась и оказала большое влияние на теоретическую медицину.

Наиболее известный труд ученого «Движение животных» («De Motu Animalium»). Его учение основано на твердых биомеханических принципах, в своей работе он описал принципы мускульного сокращения и представил математические схемы движения. Он использует биомеханическую модель для объяснения движения в биомеханической системе.





R. Hooke

предположительно

(1635 – 1703)

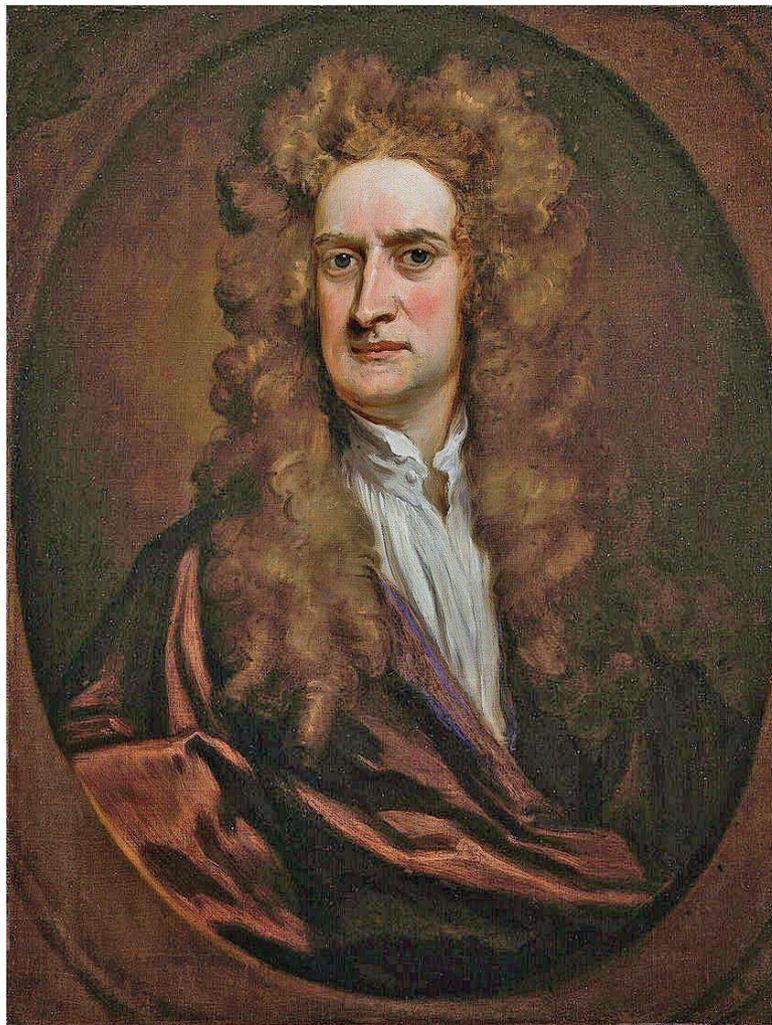
Художник Мэри Бил (1699)

Р. Гук усовершенствовал микроскоп, благодаря чему стало возможным открытие клетки.



Первое изображение живых клеток:  
рисунок из «Микрографии» Гука (1665)

1660 году Гук открыл закон упругости, который описывает линейное изменение натяжения при растяжении в упругой пружине и лёг в основу биомеханического объяснения работы мышц.



Isaac Newton (1642-1727)

английский математик, механик, оптик, философ

Открытие Ньютоном трёх основных законов механики завершило формирование базиса для биомеханических исследований.

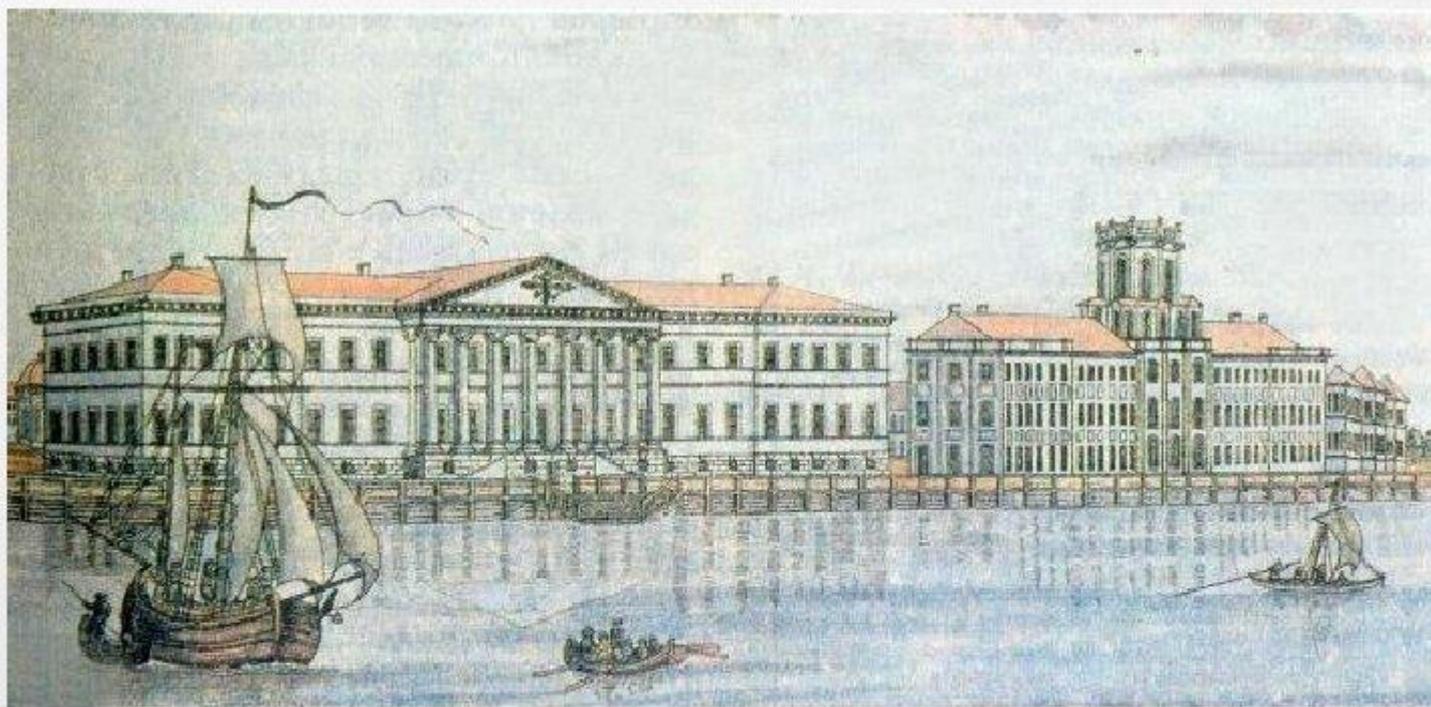


ПЁТР I

1672-1725

# 1725 – открытие Академии наук в Петербурге

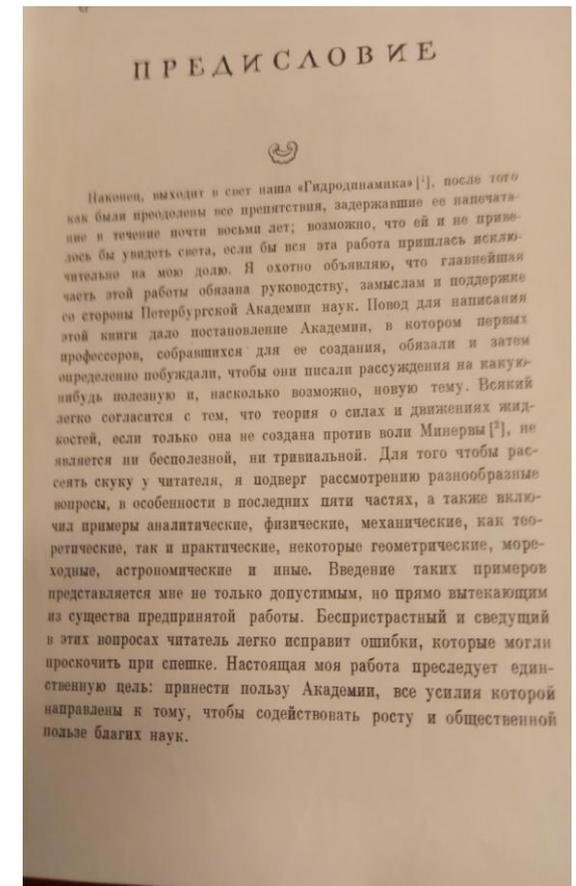
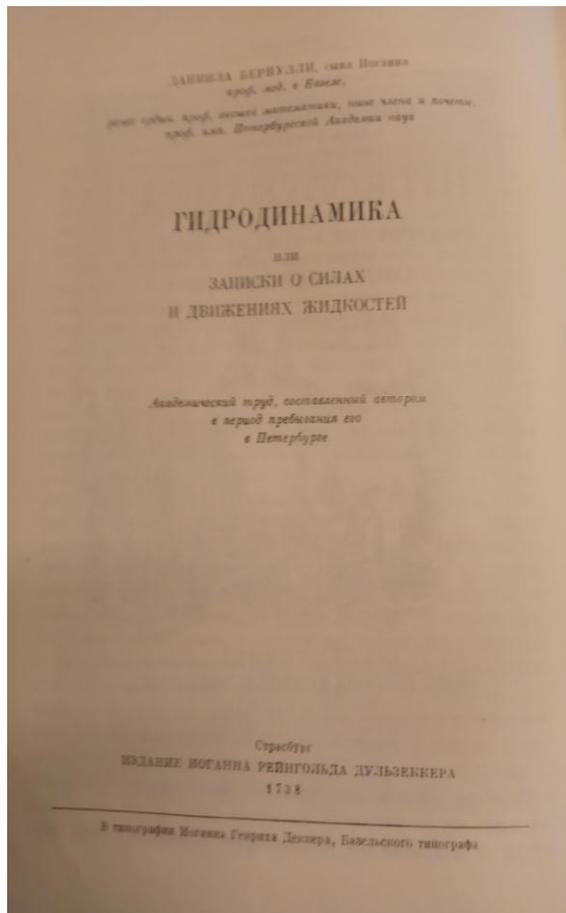
---





Даниил Бернулли (1700–1782) — швейцарский физик, механик и математик, один из создателей кинетической теории газов, гидродинамики и математической физики.

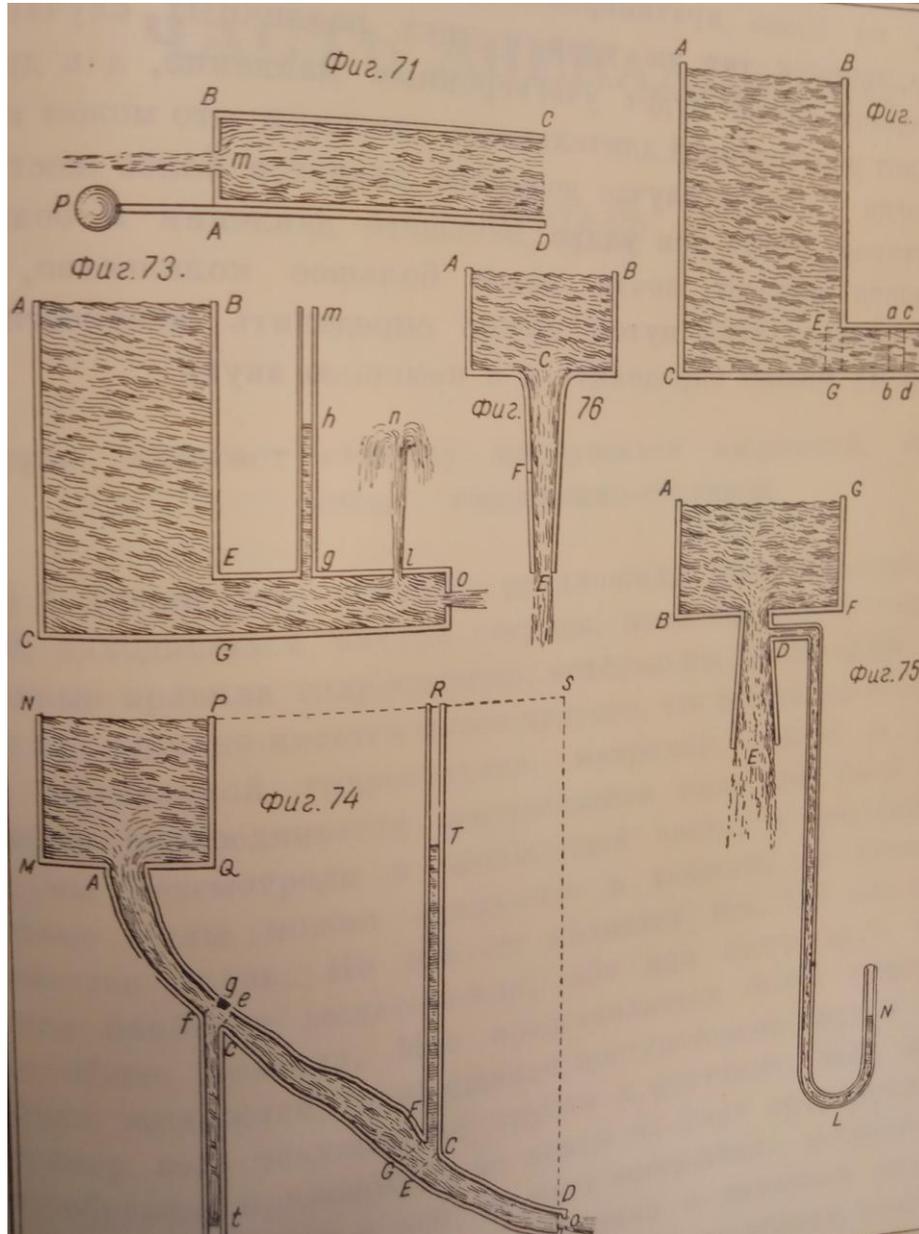
Сын Иоганна Бернулли.



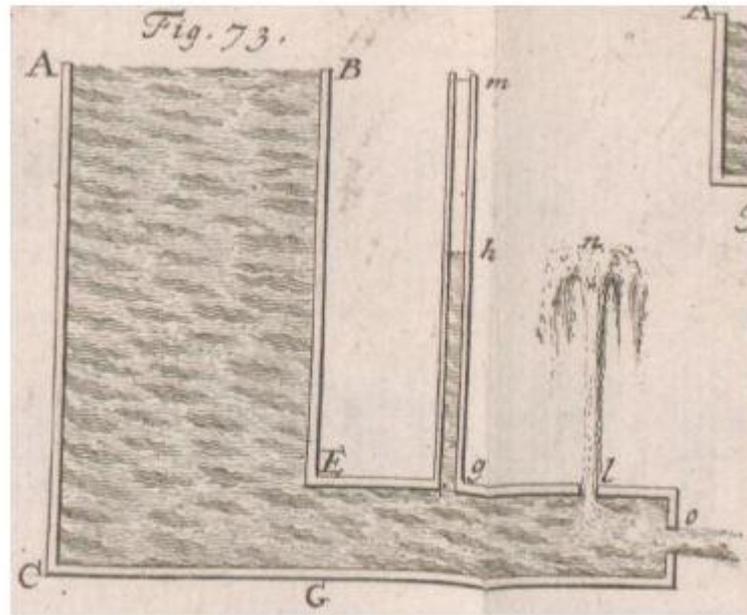
$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh + p = const$$

Здесь  $\rho$  — плотность жидкости;  $v$  — скорость потока;  $h$  — высота;  $p$  — давление;  $g$  — ускорение свободного падения.

До сих пор в биомеханике применяется принцип Бернулли, согласно которому величина мышечного сокращения при прочих равных условиях пропорционально длине входящих в мышцу волокон.

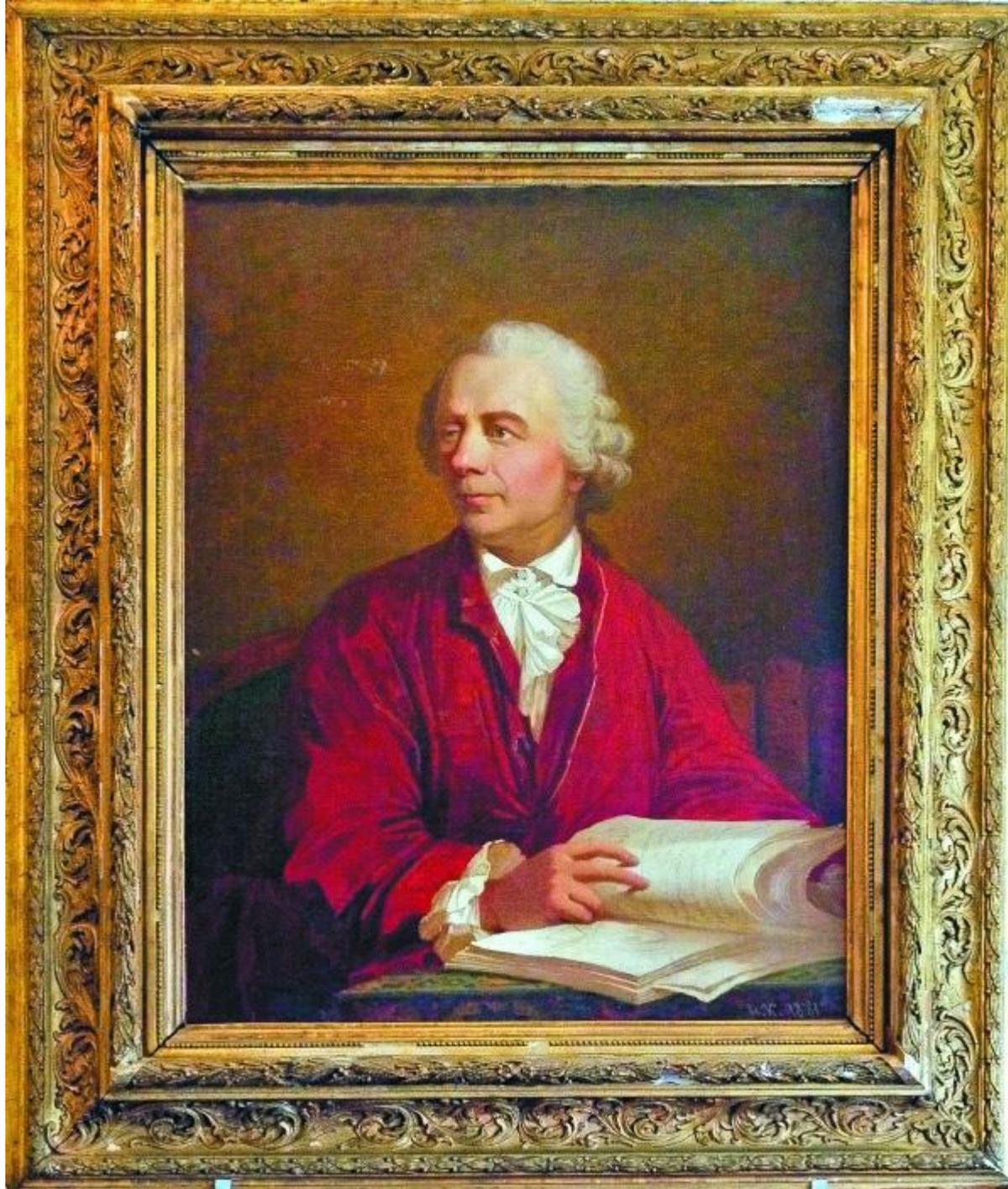


В монографии «Гидродинамика или записки о силах и движениях жидкостей» (1738) он показал возможность изучения кровообращения и предложил способ измерения давления крови в сосудах.



**Figure 3. Figure 73 from *Hydrodynamica* (Bernoulli, 1738)**

Дэниел экспериментировал, прокалывая стенку трубы небольшой соломинкой с открытым концом, и отметил, что высота, на которую жидкость поднималась по соломинке, была связана с давлением жидкости в трубе.



Портрет «неизвестного». К 300-летию Леонарда Эйлера

«ПРИРОДА» №6, 2007 • ИСТОРИЯ НАУКИ •

[https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/430479/](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430479/)

В 1742 году Эйлер (1707- 1783) впервые сформулировал и решил задачу о течении жидкости в эластичной трубке и в Дижонской академии наук получил премию. Эйлер представил вывод уравнения движения невязкой жидкости и уравнения неразрывности для сжимаемой сплошной среды в виде уравнения с частными производными. В 1775 году (опубликовано в 1862 г.) Эйлер исследовал волновое течение крови по артериям с учётом зависимости площади поперечного сечения сосуда от давления и продольной скорости движения жидкости.

$$\left(\frac{ds}{dt}\right) + \left(\frac{dvs}{dz}\right) = 0, \quad 2g \left(\frac{dp}{dz}\right) + v \left(\frac{dv}{dz}\right) + \left(\frac{dv}{dt}\right) = 0,$$

время,  $z$  — продольная координата,  $s$  — площадь поперечного сечения сосуда,  $p$  и  $v$  — средние по сечению давление и

необходимо задать зависимость  $s(p)$ , и Эйлер использовал два вида определяющих соотношений  $s = \Sigma p / (c + p)$  и  $s = \Sigma(1 - \exp(-p/c))$ . Хотя ни одна из зависимостей не соответствует эксперименталь-

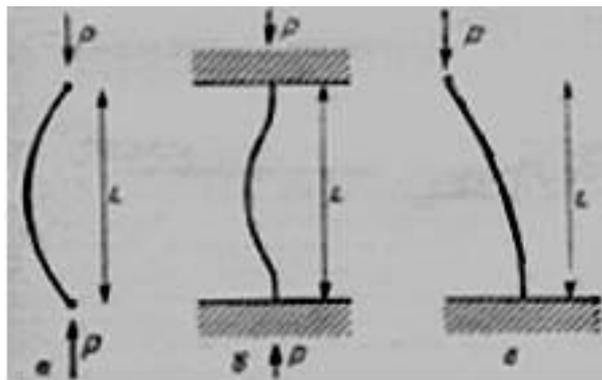
Эйлер не смог решить полученную систему уравнений из-за значительных математических трудностей и в заключение он произнёс фразу:

**«Если бы Бог хотел, чтобы мы поняли течение крови по артериям, он не придумал бы такие сложные уравнения».**

В 1775 году Эйлер сделал доклад «Основы определения движения крови через артерии» на заседании Петербургской академии наук. В 1862 году уже после смерти Эйлера работа была опубликована. В ней им была дана формулировка задачи об одномерных нестационарных течениях жидкости в деформируемых трубках.

Материалы взяты из статьи Н.Н. Кизиловой «Л.Эйлер и теория пульсовых волн в артериях».  
Материалы Международной конференции «Леонард Эйлер и современная наука» СПб. 2007.  
С.283-288.

В 1757 году им была выведена формула, ставшая классической в механике деформируемого твердого тела, для определения критической нагрузки  $P$  при сжатии упругого стержня, длиной  $L$



$$P = \pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

где  $E$ -модуль Юнга,  $I$  - момент инерции сечения.

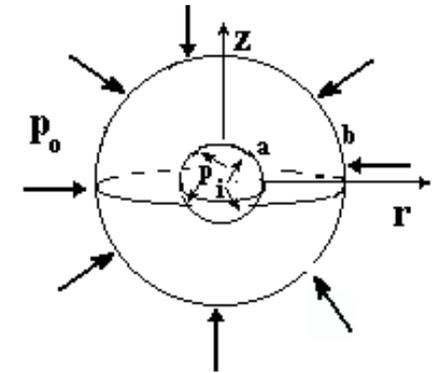
Сжатый стержень, дугообразное искривление кости

Спустя почти сто лет, эта формула была применена для расчета прочности опорно-железнодорожных мостов, и модель Эйлера принесла практическую пользу в проведении экспериментов. В биомеханике эту формулу можно применить для оценки допустимой нагрузки на кости в зависимости от состояния тканей, т.е. при учете изменения величины модуля Юнга от времени, возраста, соотношения компонентов структуры и других параметров. Такие исследования особенно необходимы при оценке состояния спортсменов и при разработке детских спортивных программ.





Рис. 12. Общий вид Исаакиевского собора по первому проекту Монферрана. Из издания Монферрана «Eglise de St. Isaac...» 1820 года.



Gabriel LAMÉ (1795-1870)

Габриель Ламе – французский математик, механик, физик и инженер, член-корреспондент Петербургской АН; член Парижской академии наук, профессор Политехнической школы и Парижского университета.

В 1820-1831 годах работал в России, в Петербургском Институте Корпуса инженеров путей сообщения.

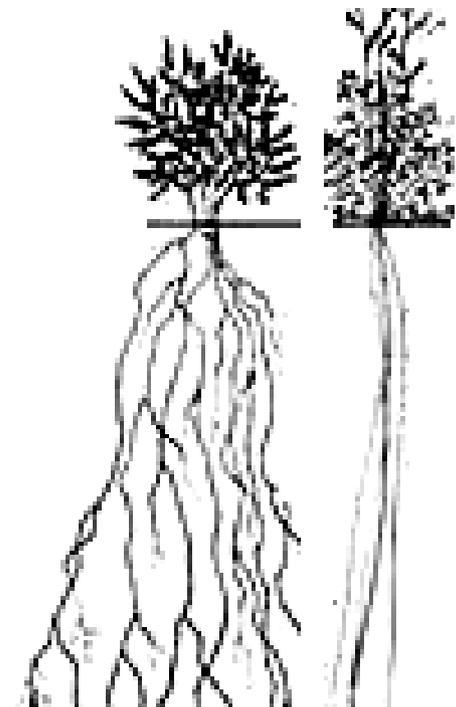
Формула этой кривой, иногда называемой суперэллипсом:

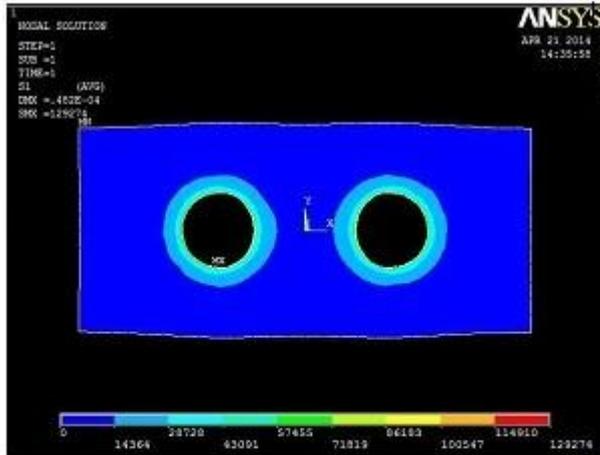
$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^m = 1 \quad (1)$$



Параболический ли купол Исаакиевского собора?  
Виктор Чебыкин

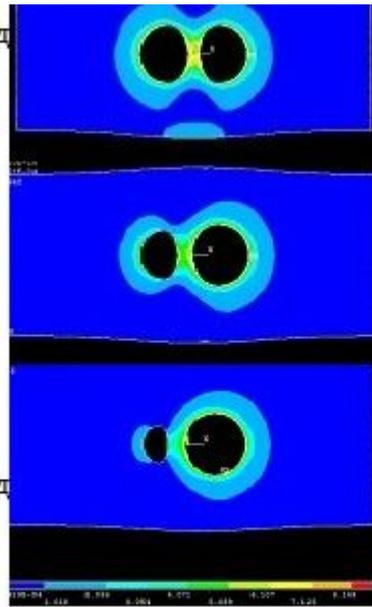
[https://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=1753](https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=1753)



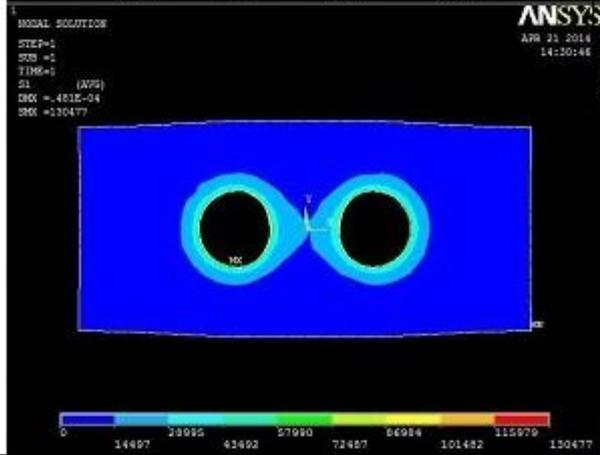


Расстояние  
 включениями  
 $R=8r$ .

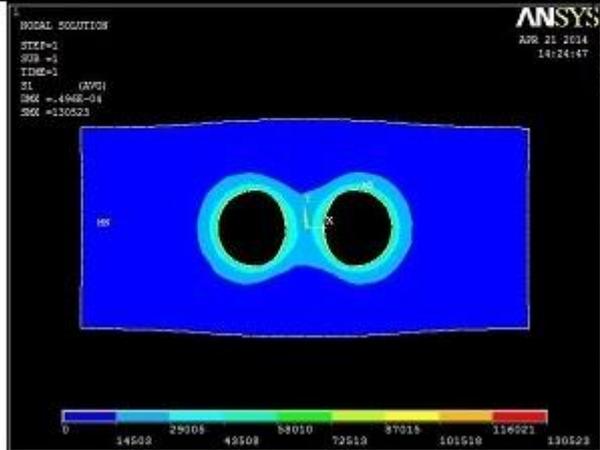
между



между

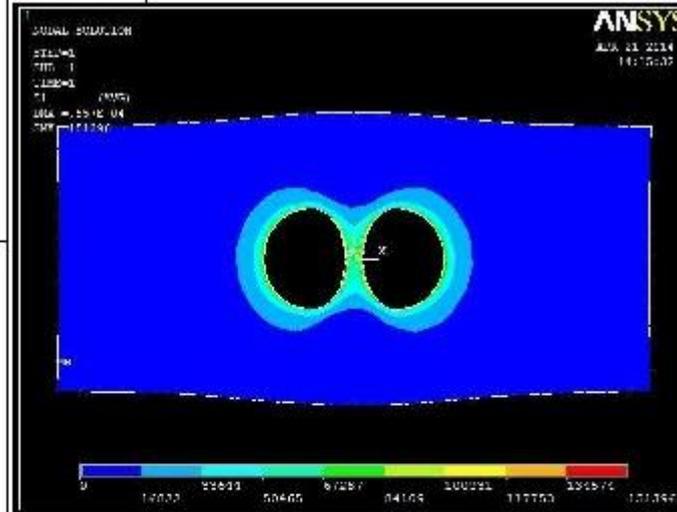


Расстояние  
 включениями  
 $R=6r$ .



Расстояние  
 включениями  
 $R=4r$ .

между



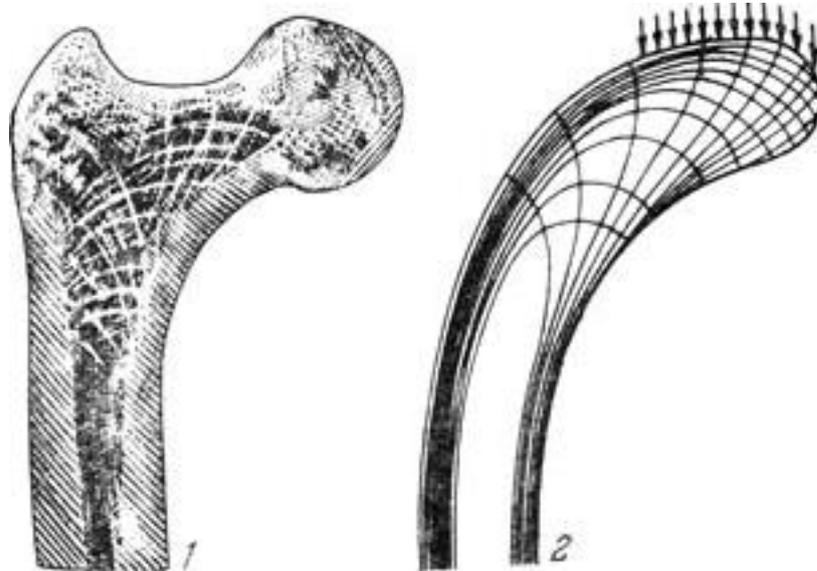
Уильям Гарвей (1578–1657) и Рене Декарт (1596–1650) в своих работах отметили сходство между людьми и механизмами.

Попытки обоснования связи формы костей с приложенными механическими усилиями были предприняты в 1638 году Галилео Галилей (1564–1643).

В 1866 году врач Мейер (Meyer) в Цюрихе и профессор Кульман (Culmann) из Цюрихского политехникума на примере бедренной кости показали, что строение костной ткани соответствует законам механики, в частности, траектории трабекул губчатой ткани совпадают с линиями максимальных напряжений и сопоставили напряженное состояние костей с распределением напряжений в деталях башенного крана.



G.H. Meyer  
1801-1869



Трабекулы (1) изостаты (2)  
в бедренном суставе, в башенном  
кране



Culman Ch.  
(1821 - 1881)



Wilhelm Roux 1850 — 1924

Немецкий учёный, профессор анатомии и директор анатомического института в Галле, в Пруссии.

1883г. - В. Ру доказал, что давление является единственным биомеханическим стимулятором роста кости

1897г. - Вульф сформулировал закон трансформации кости: "Каждое изменение в функции кости имеет следствием определенные изменения в архитектуре и внешней форме согласно математическим законам"

Термин «биомеханика» одним из первых использовал в 1887 г. венский врач Мориц Бенедикт (1835—1920) в своем труде «ber mathematische Morphologie und Biomechanik».



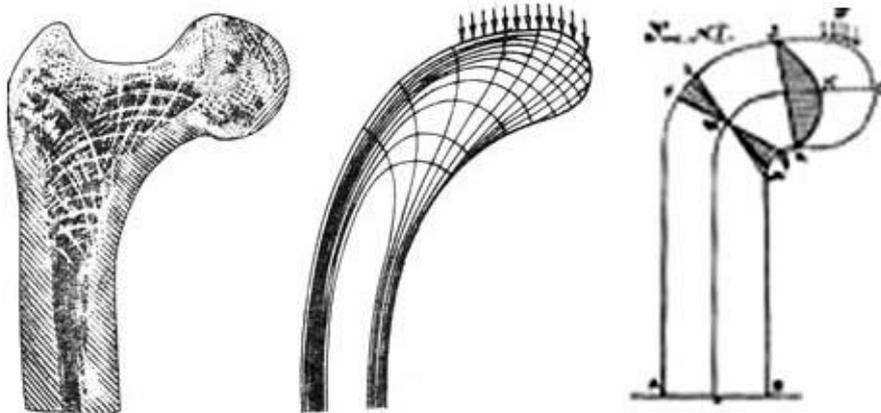
Wolff (1836—1902)

Юлиус Вольф

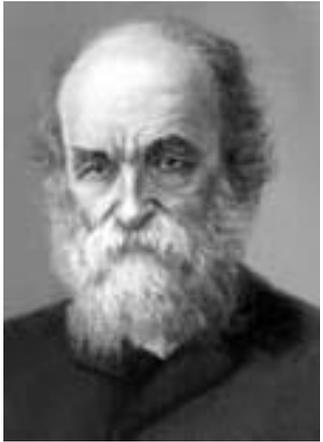
Немецкий анатомом и хирург

В России этому вопросу первым большое внимание уделил анатом профессор **П.Ф. Лесгафт** (1837-1909).

Подобные рассуждения и рисунки можно встретить, например, в учебнике Н.А. Белелюбского «Строительная механика» (1897).



Распределение трабекул в кости,  
линий главных напряжений в модели кости,  
распределение нагрузок кости



П.Ф. Лесгафт  
1837-1909



Пресс Вердера (1876) СПбГУПС



Машина Вердена

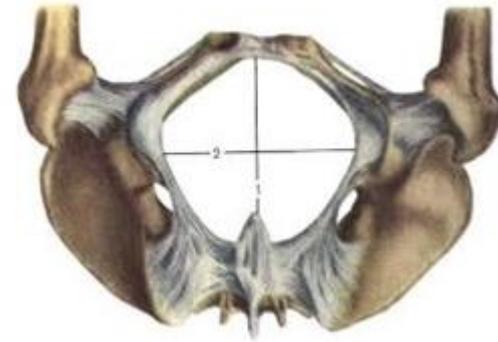
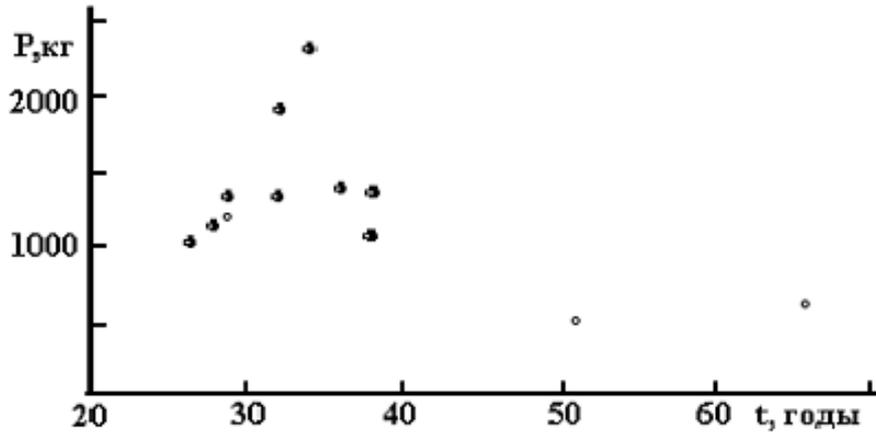


Н.А. Белелюбский  
1845-1922

Попов В.О. Изменение формы костей под влиянием ненормальных механических условий в окружающей среде. СПб. 1880. 78с.

Лесгафт П. Ф., Долбня И. П. Теория простых суставов. - Известия С.-Петербургской биологической лаборатории. - 1887. - Т. II. - Вып. 2. - С. 22-44

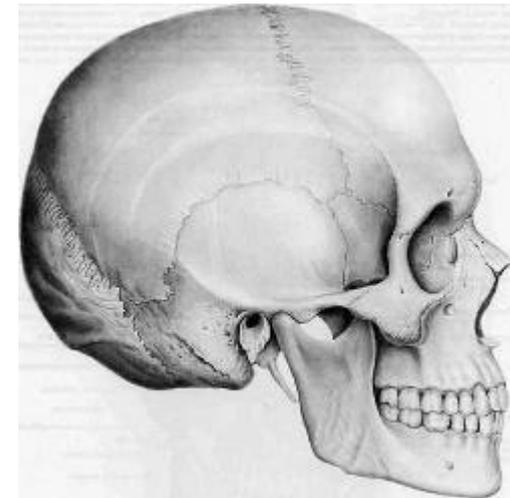
Форма движения зависит от геометрической формы соприкасающихся поверхностей, а величина движений — от разности между поверхностями головки и ямки



Возрастные зависимости критических нагрузок для таза

$$E(\xi) = E[\xi(S, p_k, T, \phi, OC, \dots)]$$

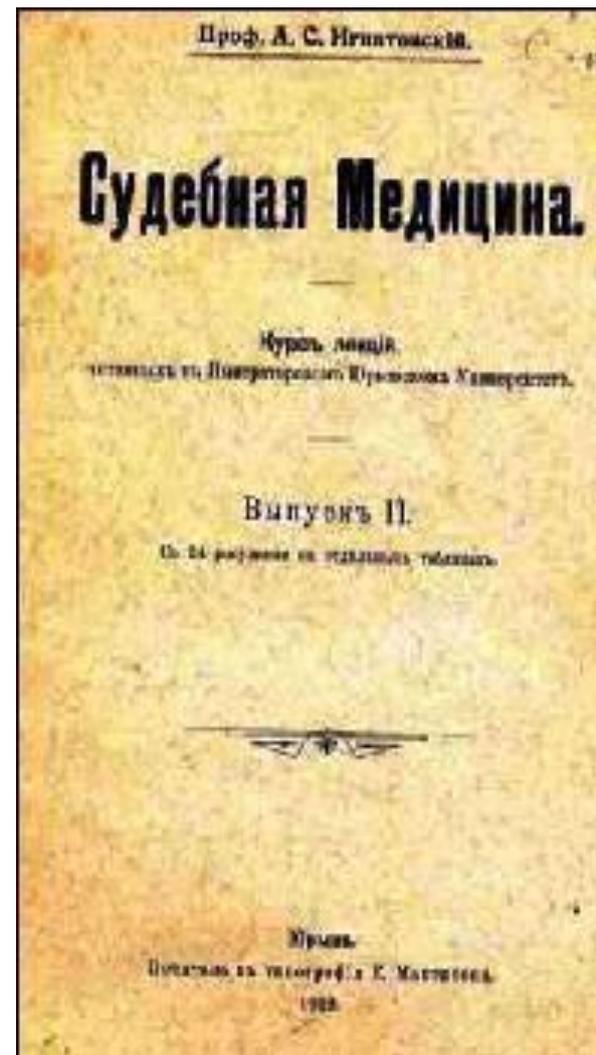
При сжатии конструкция черепа выдержала нагрузку 1440 кг (90 пудов).



Петр Францевич свои исследования в области биомеханики мышц и суставов, внедрял математический анализ в изучение анатомического строения и функций опорно-двигательного аппарата, он вместе с математиком И.П.Долбней выполнил интересную работу - «Теория простых суставов».



Афанасий Сергеевич Игнатовский  
(1858 - 1935)

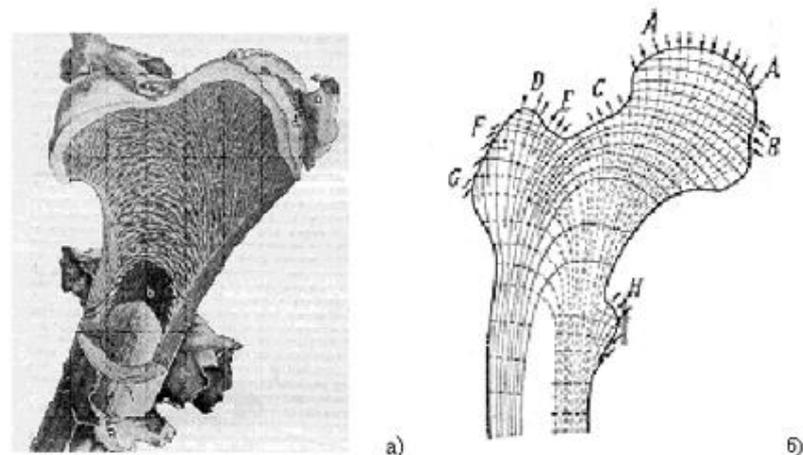
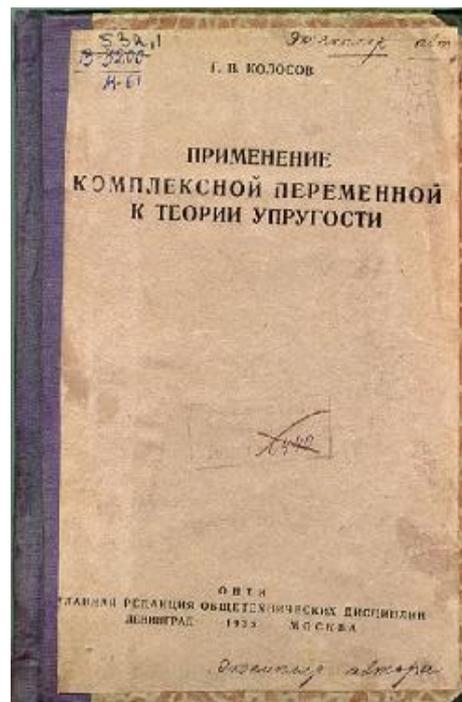


В диссертации «К вопросу о переломах черепа» (1892) моделировал удар по голове камнем в зависимости от размера камня и места расположения на голове, анализировал характер образовавшихся трещин.





Гурий Васильевич  
Колосов  
(1867 -1936)

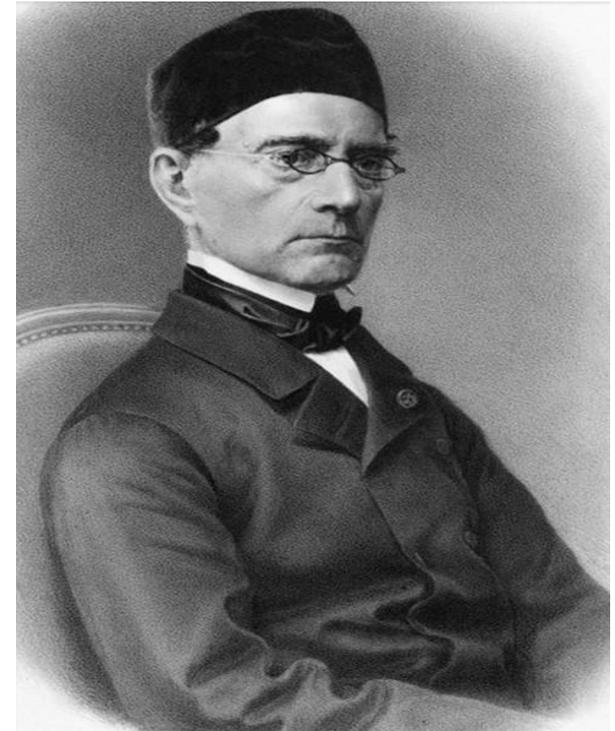
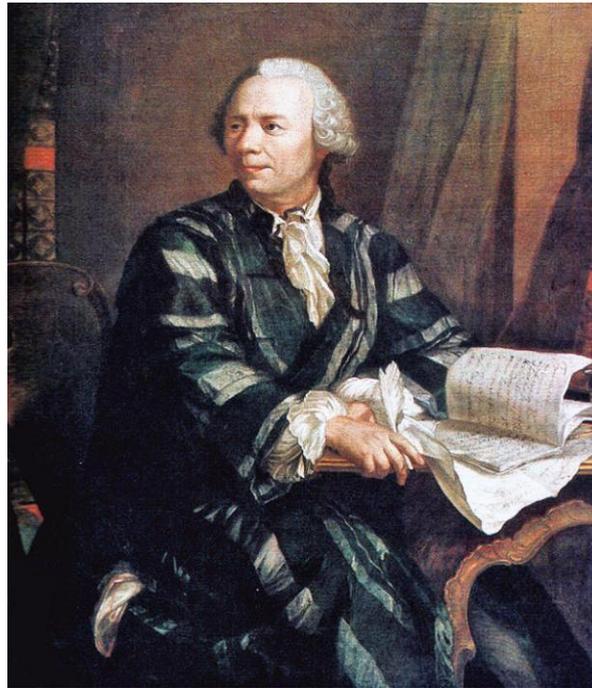


Распределение трабекул в кости (а) и  
линий главных напряжений в модели  
кости (б)

Значимость закона Вульфа была также подчеркнута - в монографии члена-корреспондента АН СССР, профессора Ленинградского университета Колосова Г.В. «Применение комплексной переменной к теории упругости»

*«с линиями главных напряжений мы часто встречаемся в природе при выработывании каким-нибудь организмом или растением наиболее прочного материала»*

# ПЕРВЫЕ АКАДЕМИКИ АН РОССИИ



ДАНИИЛ БЕРНУЛЛИ    ЛЕОНАРД ЭЙЛЕР

ГАБРИЭЛЬ ЛАМЕ

С 300-летием АКАДЕМИИ НАУК РОССИИ!!!

## ЛИТЕРАТУРА

Д. Бернулли. Гидродинамика или записки о силах и движениях жидкостей. (1738).

Григорян А.Т., Ковалев Б.Д. Даниил Бернулли.- изд-во «Наука»  
Москва, 1981

Википедия

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

