

История и методология механики

Лекция № 14

Евгений Алексеевич Зайцев

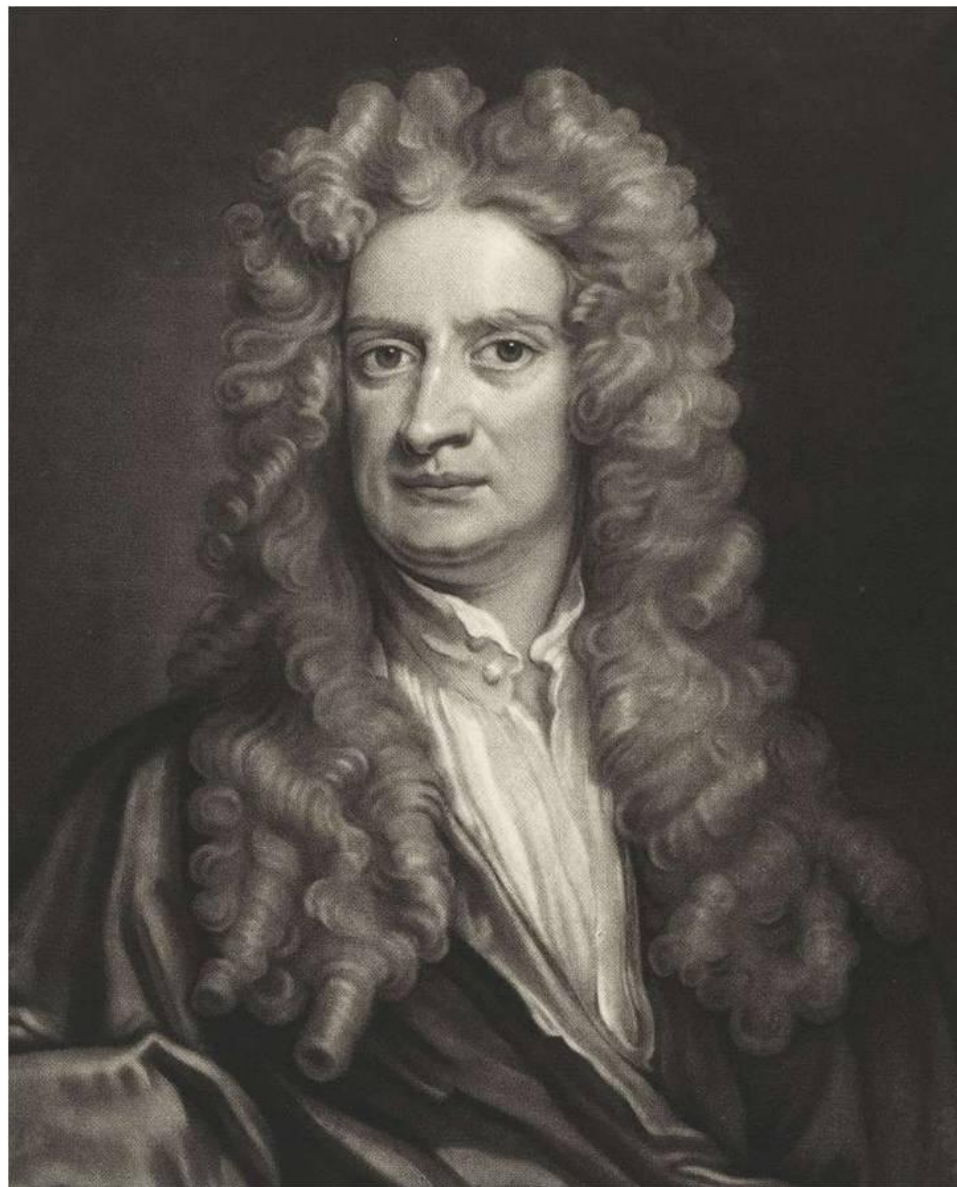
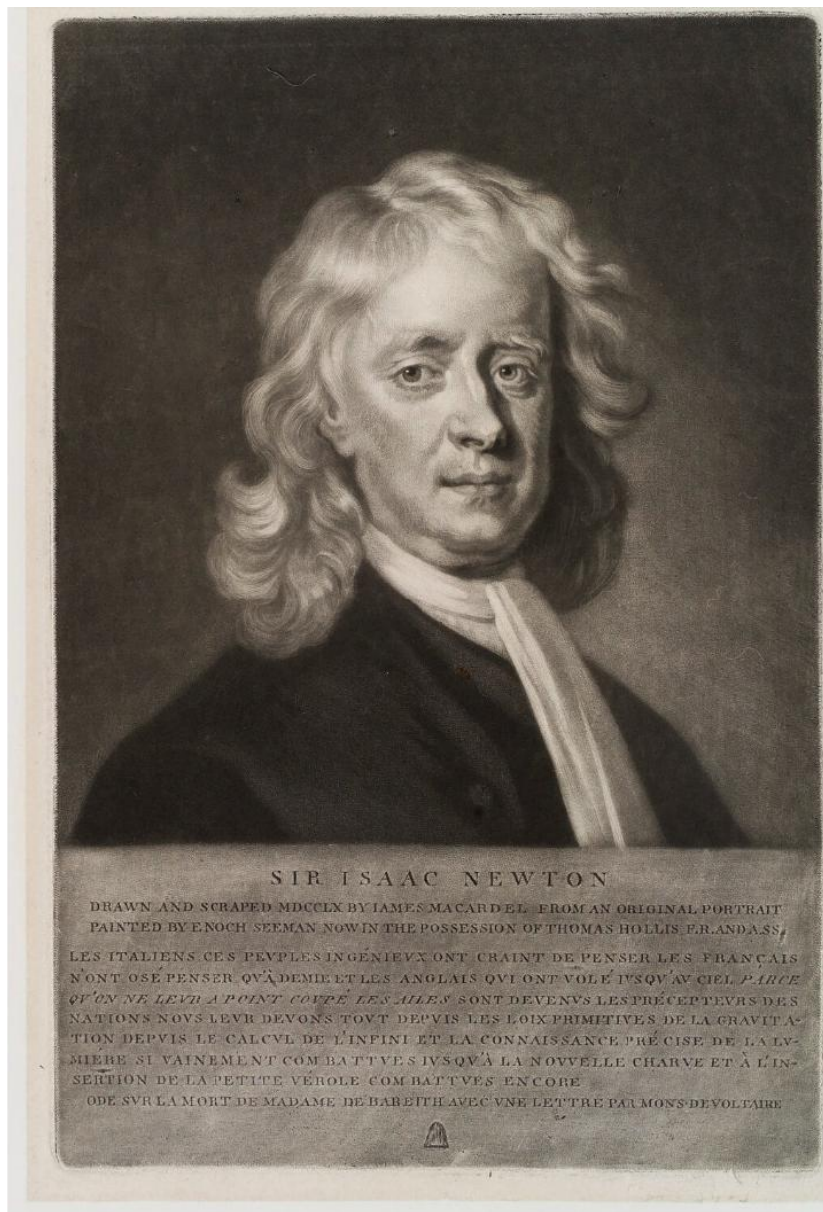
e_zaitsev@mail.ru

Тема лекции

Трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» (1687)

Книга первая. Определения, аксиомы и законы движения

ИСААК НЬЮТОН (1643–1727)



ИСААК НЬЮТОН

Исаак Ньютон родился 4 января 1643 г. (25 декабря 1642 г. по старому стилю) в фермерской семье. Отец умер до рождения сына. Из-за перемен в семье (когда ему было 13 лет, умер его первый отчим) Ньютону пришлось прервать учебу в школе.

В 18 лет поступил в Тринити-колледж в Кембридже. Двадцатилетнему Ньютону его учитель И. Барроу уступил свою кафедру. В это время Ньютон углубленно занимался оптикой и химией.

С сер. 1660 гг. под влиянием Р. Гука начинает работу над проблемами тяготения и математической теорией движения. Результатом стала публикация трактата «Математические начала натуральной философии» (1687).

В конце XVII в. Ньютон становится «хранителем» Королевского монетного двора (Master of Mint).

В 1699 г. избран иностранным членом Парижской Академии наук.

В 1703 г. – президентом Лондонского Королевско-го общества (членом которого он был с 1672 г.).

Вскоре он был возведен в дворянское достоинство.

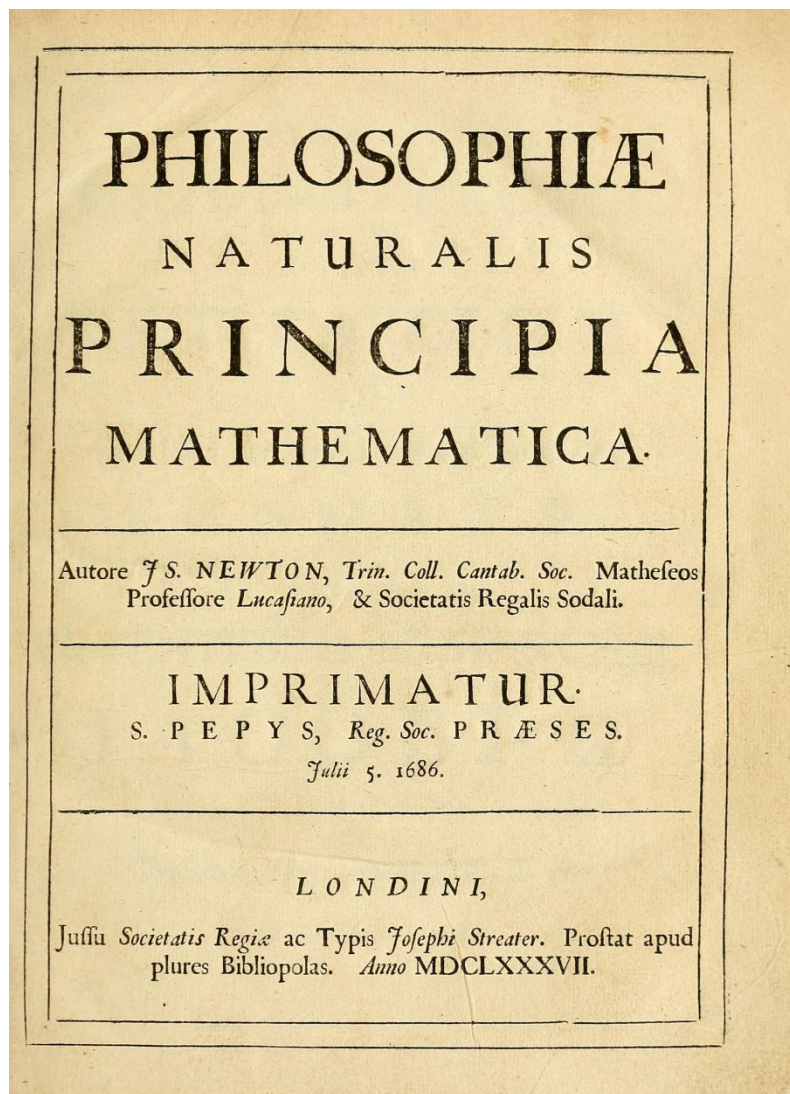
Умер Ньютон 20 марта 1727 г.

ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ НЬЮТОНА

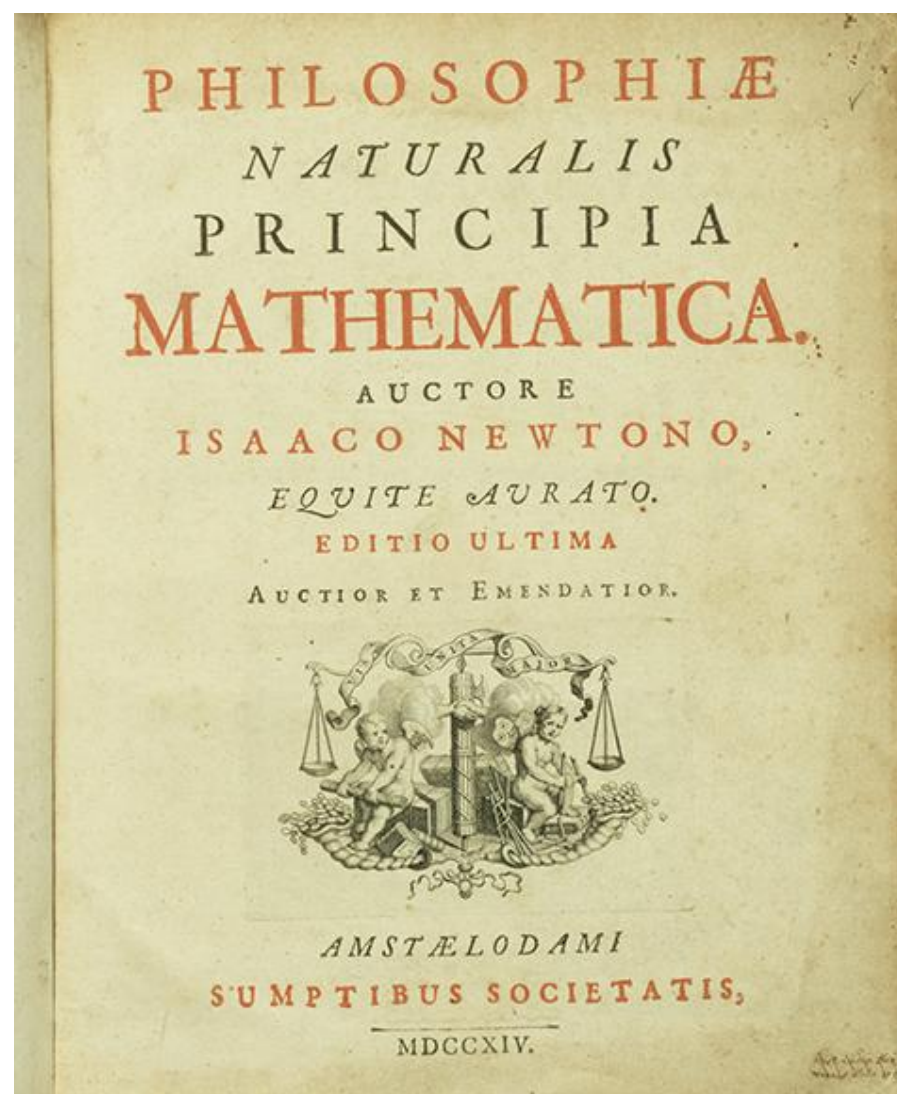
1. «Метод флюксий» (1671) (опубликован в 1736 г.)
2. «Новая теория света и цветов» (1672) (сообщение Королевскому обществу)
3. «Движение тел по орбите» (1684)
4. «Математические начала натуральной философии» (1687)
5. «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» (1704)
 - «О квадратуре кривых» (приложение к «Оптике»)
 - «Перечисление линий третьего порядка» (приложение к «Оптике»)
6. «Универсальная арифметика» (1707)
7. «Анализ с помощью уравнений с бесконечным числом членов» (1711)
8. «Метод разностей» (1711)

И. Ньютон. «Математические начала натуральной философии»

Первое издание (1687)



Второе издание (1714)



«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ» (1687)

Трактат состоит из трех книг, которым предпосланы три небольших по объему, но весьма важных по содержанию раздела: «Предисловие автора», «Определения», «Аксиомы, или законы движения».

В «Предисловии» Ньютон формулирует цель трактата: «дать тщательное развитие приложений математики к физике» (физика и натуральная философия для Ньютона синонимы).

«Древние рассматривали механику двояко: как *рациональную* (умозрительную), развиваемую точными доказательствами, и как *практическую*. К практической механике относятся все ремесла и производства, именуемые механическими, от которых получила свое название и самая *механика*.

Так как ремесленники довольствуются в работе лишь малой степенью точности, то образовалось мнение, что механика тем отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит к геометрии, менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежат исполнителю работы: кто работает с меньшей точностью, тот — худший механик, и если бы кто-нибудь смог исполнять изделие с совершеннейшею точностью, тот был бы наилучшим из всех механиков».

Таким образом, по Ньютону, статус практической механики столь же высок, как и статус геометрии.

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ» – ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ

Несмотря на высокую оценку практической механики, в Ньютон не собирался писать трактат о «ремеслах», об усилиях, «производимых руками».

Его произведение носит ярко выраженный теоретический характер, оно посвящено исследованию «сил природы» методами математики.

Ньютон предупреждает: «Будем, главным образом, заниматься тем, что относится к тяжести, легкости, силе упругости, сопротивлению жидкостей и к тому подобным притягательным или напирющим силам. Поэтому и сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики ... состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления».

Это – программа математизации физики. В трактате она реализована в отношении движений небесных тел. Но автор верит («многое заставляет меня предполагать»), что «и остальные явления природы» можно «вывести из начал механики».

КОЛИЧЕСТВО МАТЕРИИ (МАССА)

«Определение I. *Количество материи (масса)* есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее».

Современное понимание плотности как массы единицы объема вещества приводило бы такое определение к порочному кругу; однако у Ньютона здесь нет тавтологии. Будучи атомистом, он трактовал плотность иначе. Плотность, по Ньютону, определяется числом идентичных корпускул в заданном объеме вещества. Атомистические воззрения Ньютона в «Началах» не излагаются, высказывания по этому вопросу можно найти в «Оптике», статье «О природе кислот» и письмах.

Вслед за определением массы следует пояснение: «Воздуха двойной плотности в двойном объеме вчетверо больше, в тройном — вшестеро. То же относится к снегу или к порошкам, когда они уплотняются от сжатия или таяния. Это же относится и ко всякого рода телам, которые в силу каких бы то ни было причин уплотняются.»

Ньютоновское определение количества материи (массы) через плотность хотя и не содержит круга, малопригодно для определения величины массы, поэтому Ньютон его фактически не применяет. В «Началах» для определения величины массы он использует соображения, навеянные идеями инерции, с одной стороны, и гравитации, с другой. Плотность при этом становится производной от массы и объема.

Замечание. Галилей принимал за меру материи ее вес. Такой вариант был для Ньютона неприемлем, поскольку, в отличие от Галилея, он уже знал о том, что вес тела может меняться (этот вывод он сделал, исходя из опытов, показавших изменение периода колебаний маятника на разных широтах).

КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ

«Определение II. Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.

Количество движения целого есть сумма количеств движения отдельных частей его, значит для массы, вдвое большей, при равных скоростях оно двойное, при двойной же скорости – четверное».

Замечание: Дж. Валлис определял количество движения (momentum) иначе, а именно, как меру движения, пропорциональную весу и скорости движущегося тела.

ВРОЖДЕННАЯ СИЛА ИЛИ СИЛА ИНЕРЦИИ

«Определение III. *Врожденная сила* (*vis insita*) материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения».

«Эта сила всегда пропорциональна массе, и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее.

От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа «силою инерции» (*vis inertiae*). Эта сила проявляется телом единственно лишь, когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой силы может быть рассматриваемо двояко: и как сопротивление и как напор. Как сопротивление – поскольку тело противится действующей на него силе, стремясь сохранить свое состояние; как напор – поскольку то же тело, с трудом уступая силе сопротивляющегося ему препятствия, стремится изменить состояние этого препятствия. Сопротивление приписывается обыкновенно телам покоящимся, напор – телам движущимся. Но движение и покой, при обычном их рассмотрении, различаются лишь в отношении одного к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простому взгляду представляется».

ВРОЖДЕННАЯ СИЛА ИЛИ СИЛА ИНЕРЦИИ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

В одном из писем Ньютон характеризует «врожденную силу» как «сущностную», т.е. выражающую механическую «сущность» тела.

«Врожденная сила», по Ньютону, носит пассивный характер: она препятствует изменению состояния тела (будь то покой или равномерное движение). Сама по себе она не может изменить это состояние. Использование понятия силы в контексте инерциального движения свидетельствует о том, что Ньютон не освободился полностью от аристотелевского (и обыденного) представления, что движение предполагает наличие движущей силы.

У кого Ньютон мог заимствовать представление о «силе инерции»?

Лейбниц обвинял Ньютона в заимствовании этой идеи у Кеплера. Однако, у Кеплера инерция – это сила, которая препятствует выходу тела из состояния покоя; когда тело движется, она же обуславливает его стремление вернуться в состояние покоя. Это – отголосок средневековой идеи, что всякое тяжелое тело, приведенное в движение, имеет склонность к покою (*inclinatio ad quietem*).

По Ньютону, напротив, у движущегося тела нет стремления к покою.

Смысл понятий инерции у Ньютона и Кеплера совпадает в случае покоящегося тела, но радикально отличается в случае движения.

ПРИЛОЖЕННАЯ СИЛА И ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ СИЛА

*«Определение 4. Приложенная сила (*vis impressa*) есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.*

Сила проявляется единственно только в действии, и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы».

«Определение 5. Центростремительная сила есть та, с которою тела к некоторой точке, как к центру, отовсюду притягиваются, гонятся или как бы то ни было стремятся.

Такова сила тяжести, под действием которой тела стремятся к центру Земли; магнитная сила, которою железо притягивается к магниту, и та сила, каковою бы она ни была, которою планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и вынуждаются обращаться по кривым линиям. Камень, вращаемый в праще, стремится удалиться от вращающей пращу руки, и этим своим стремлением натягивает пращу тем сильнее, чем быстрее вращение, и как только ее пустят, то камень улетает».

Впервые отчетливо сформулирована идея тождества законов, управляющих земной и небесной механикой, и даже магнетизма (ср. Гильберт, «Трактат о магните», 1600).

ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ СИЛА (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

«Силу, противоположную сказанному стремлению, которою праща постоянно оттягивает камень к руке и удерживает его на круге, т. е. силу, направленную к руке или к центру описываемого круга, я и называю *центростремительной*. Это относится и до всякого тела, движущегося по кругу. Все такие тела стремятся удалиться от центра орбиты, и если бы не было некоторой силы, противоположной этому стремлению, которая их и удерживает на их орбитах, то они и ушли бы по прямым линиям, двигаясь равномерно.

Брошенное тело, если бы силы тяжести не было, не отклонялось бы к Земле, а уходило бы в небесное пространство по прямой линии равномерно, если бы не было и сопротивления воздуха. Своею тяжестью оно оттягивается от прямолинейного пути и постоянно отклоняется к Земле в большей или меньшей степени, сообразно напряжению силы тяжести и скорости движения. Чем меньше будет отнесенное к массе напряжение тяжести и чем больше будет скорость, с которою тело брошено, тем менее оно отклонится от прямой линии и тем дальше отлетит».

ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ СИЛА (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

«Если свинцовое ядро, брошенное горизонтально силою пороха из пушки, поставленной на вершине горы, отлетит по кривой ... на две мили, то брошенное с двойною скоростью оно отлетит вдвое дальше, а если с десятерною в десять раз. Увеличивая скорость, можно по желанию увеличить и дальность полета и уменьшить кривизну линии, по которой ядро движется, ... можно заставить его окружить всю Землю или даже уйти в небесные пространства и продолжать удаляться до бесконечности. Подобно тому, как брошенное тело может быть отклонено силою тяжести так, чтобы описывать орбиту вокруг Земли, так и Луна ... может быть отклоняема от прямолинейного пути и вынуждена обращаться по своей орбите; без такой силы Луна не могла бы удерживаться на своей орбите. Если бы эта сила была меньше соответствующей этой орбите, то она отклоняла бы Луну от прямолинейного пути недостаточно, а если больше, то отклонила бы ее более, чем следует, и приблизила бы ее от орбиты к Земле. Следовательно, надо, чтобы эта сила была в точности надлежащей величины.

Дело математиков – найти такую силу, которая в точности удерживала бы заданное тело в движении по заданной орбите с данною скоростью. Или наоборот, найти криволинейный путь, на который заданною силою будет отклонено тело, вышедшее из заданного места с заданною скоростью».

АБСОЛЮТНОЕ ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

Раздел «Определения» Ньютон завершает «Поучением», где вводятся важные понятия абсолютного и относительного времени и пространства:

«I. *Абсолютное*, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью.

Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения, мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год».

Доклассическая наука (до XVII в.) не знала понятия абсолютного времени, т.е. «длительности», присущей покоящимся телам. Время в ней определялось исключительно внешним движением.

«II. *Абсолютное пространство* по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное».

АБСОЛЮТНОЕ ПРОСТРАНСТВО – «ЧУВСТВИЛИЩЕ» БОГА

В «Оптике» Ньютон назвал абсолютное пространство «чувствилищем Бога» (*sensorium Dei*). Такое отождествление позволяет трактовать характерные свойства абсолютного пространства – бесконечность, однородность и изотропность (равноправность направлений) – как «следствия» соответствующих свойств Бога (проистекающих из Его бесконечности).

Вопрос: является ли отождествление абсолютного пространства с «чувствилищем Бога» у Ньютона глубоко продуманной научно-философской концепцией, или это – всего лишь метафора?

Аргументы в пользу первой точки зрения: наличие сходного тезиса в предшествующей философской традиции (Г. Мор, кембриджские неоплатоники).

Аргументы в пользу метафоричности:

(i) история со вставкой частицы «как бы» перед словосочетанием «чувствилище Бога» в тираж «Оптики»;

(ii) невозможность формулировки закона инерции – о бесконечном прямолинейном движении – без признания бесконечности, однородности и изотропности пространства.

АКСИОМЫ ИЛИ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

ПРЕДЫСТОРИЯ

Термин «закон природы» почти не использовался до XVII в. В лексикон творцов новой науки он вошел во многом благодаря Декарту, который назвал этим термином правила своей динамики, важнейшим из которых был закон прямолинейной инерции – предтеча первого закона Ньютона.

Ньютон использовал этот термин в отношении своих законов (в письме Р. Котсу). Аналогично поступали и его последователи (тот же Котс).

ПРОБЛЕМАТИЧНОСТЬ ПОНЯТИЯ «ЗАКОН ПРИРОДЫ»

Понятие закона происходит из правовой сферы. В ней закон носит характер предписания, которое может быть, в принципе нарушено (в реальной жизни такое случается). Правовой закон относителен.

Закон природы, как он понимается в классической физике, такую возможность исключает. Природа, в отличие от человека, действует не свободно, но необходимым образом: ее процессы носят строго регулярный характер.

Вопрос: как могло случиться, что закон-предписание превратился в XVII в. в закон-описание, носящий абсолютный характер (законы движения в классической механике)?

ЗАКОН ИНЕРЦИИ

«Закон I. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние».

Предтечей первого закона Ньютона является закон инерции (в виде двух законов), сформулированный Декартом в «Первоначалах философии» (лекция 11).

Другим предтечей закона инерции была первая «гипотеза» Гюйгенса из 2-й части «Маятниковых часов»:

«Если бы веса не было и воздух не сопротивлялся движению тел, то каждое из них продолжало бы достигнутое движение прямолинейно и с постоянной скоростью».

Гюйгенс первым сформулировал тезис о прямолинейности инерциального движения, не отягощая его представлениями о наличии также круговой инерции. Отсутствие у Гюйгенса круговой инерции объясняется тем, что он понимал, что инерциальное вращение твердого тела может быть представлено как композиция инерциального прямолинейного движения его частей (по касательной) и ускоренного движения в направлении оси вращения, вызванного действием сил, связывающих части тела воедино.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

«Закон II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

В комментарии («Поучении») к законам движения Ньютон отмечал:

«Пользуясь первыми двумя законами ... *Галилей* нашел, что падение тел пропорционально квадрату времени и что движение брошенных тел происходит по параболе; это подтверждается опытом, поскольку такое движение не претерпевает замедления от сопротивления воздуха».

Указание на то, что Галилей владел первые двумя законами, не имеет под собой основания. Известно, что Ньютон не читал «Бесед» Галилея, а был знаком с их идеями только «из третьих рук». Он не знал деталей идеи инерции у Галилея.

Инерция у Галилея была не прямолинейной, как у самого Ньютона, а круговой. При этом окружность, по которой тело могло двигаться по инерции, была особенной: ее центр должен был совпадать с центром Земли. То, что мы называем (насильственной) силой тяжести, для Галилея было естественным свойством тела. Переносить закон естественного движения под действием природной тяжести на насильственное движение (под действием внешней силы), он, в принципе, не мог. Иными словами, Галилей не мог сформулировать второй закон. Это сделал сам Ньютон. Как остроумно заметил один историк науки, надо было быть Ньютоном, чтобы усмотреть у Галилея первые два закона механики.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

«Закон III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие; иначе, взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны».

Ньютон отмечал, что третий закон был «добавлен» к первым двум, якобы открытым Галилеем, тремя учеными – К. Реном, Дж. Валлисом и Гюйгенсом.

Из законов движения Ньютон выводит ряд следствий.

Первое следствие особенно важно. Это закон параллелограмма движений или принцип *независимости* действия сил: «при силах совокупных тело описывает диагональ параллелограмма в то же самое время, как его стороны – при раздельных».

Закон параллелограмма движений использовал Галилей при выводе параболичности траектории полета снаряда (в частном случае горизонтальной стрельбы). В более общей форме – при произвольном угле возвышения орудия – он был сформулирован и применен Торричелли.

Для механики второй половины XVII в. этот принцип оставался в значительной степени проблематичным. В силу традиции, восходящей к Аристотелю, сложное движение не могло быть разложено на частичные движения, вызываемые его компонентами.

КНИГА I. «О ДВИЖЕНИИ ТЕЛА» (В ПУСТОТЕ)

Первая книга «Начал» посвящена движению тела в отсутствии сопротивления; вторая – движению в присутствии сил сопротивления (разного вида).

Первый отдел первой книги называется «О методе первых и последних отношений». В нем изложен математический аппарат, используемый в кн. 1 и 2.

С современной точки зрения, в нем сформулированы правила предельного перехода. Эти правила изложены на языке геометрии и относятся к предельным переходам от ступенчатых фигур, аппроксимирующих гладкие кривые, к самим этим кривым.

Второй и третий отделы кн. 1 посвящены изложению законов, которым починены действия центростремительных сил.

Здесь приведено доказательство теоремы о то, что второй закон Кеплера (закон площадей) выполнен для всякого движения, одна компонента которого определяется действием на тело центростремительной силы, а другая является инерциальной (предложение 1). В предложении 2 первого отдела доказывается обратная теорема о том, что всякое движение, для которого выполнен закон площадей, определяется двумя компонентами – действием ускоряющей центростремительной силой и силой инерции.

Геометрический метод в классической механике XVII в. (построение траекторий)

Основной тезис: Всякое движение в силовом поле состоит из двух компонент

- ❑ Равномерное перемещение вдоль прямой линии (инерциальное движение).
- ❑ Равноускоренное перемещение вдоль другой прямой (под действием силы).
- ❑ Траектория строится последовательно путем составления движения из этих двух компонент.

Две центральные задачи механики XVII в.

1. Задача о полете снаряда.

Траектории движения в силовое поле «плоской Земли».

Т. Гарриот, Галилей, Б. Кавальери, Э. Торричелли (пер. пол. XVII в.)

2. Движение небесных тел.

Траектории движения в центральном силовом поле.

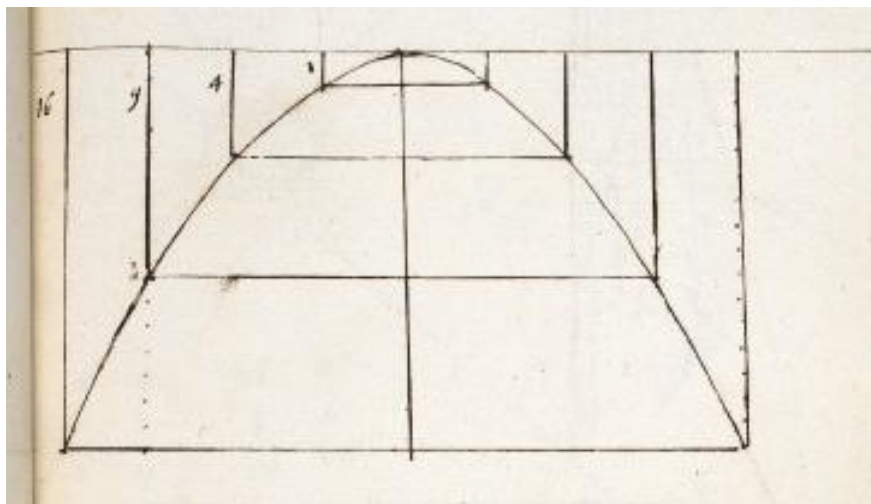
И. Ньютон (втор. пол. XVII в.)

Задача о полете снаряда. Геометрическое решение

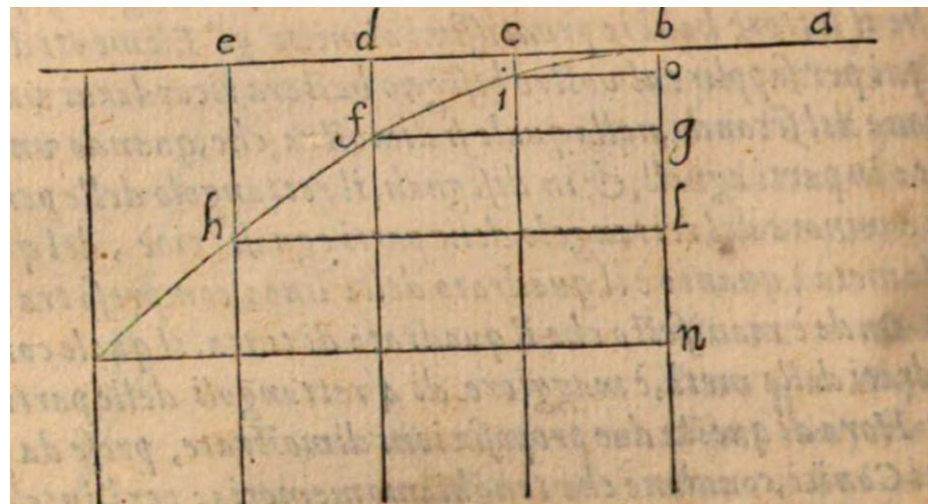
Основные свойства компонент движения

1. Инерциальная компонента сохраняет постоянное направление и скорость на протяжении всего движения. Линия инерциального движения является продолжением линии ствола орудия.
2. Движение под действием силы тяжести сохраняет постоянное направление перпендикулярное (горизонтальной) поверхности Земли. Скорость движения возрастает равномерно в соответствии с законом свободного падения.

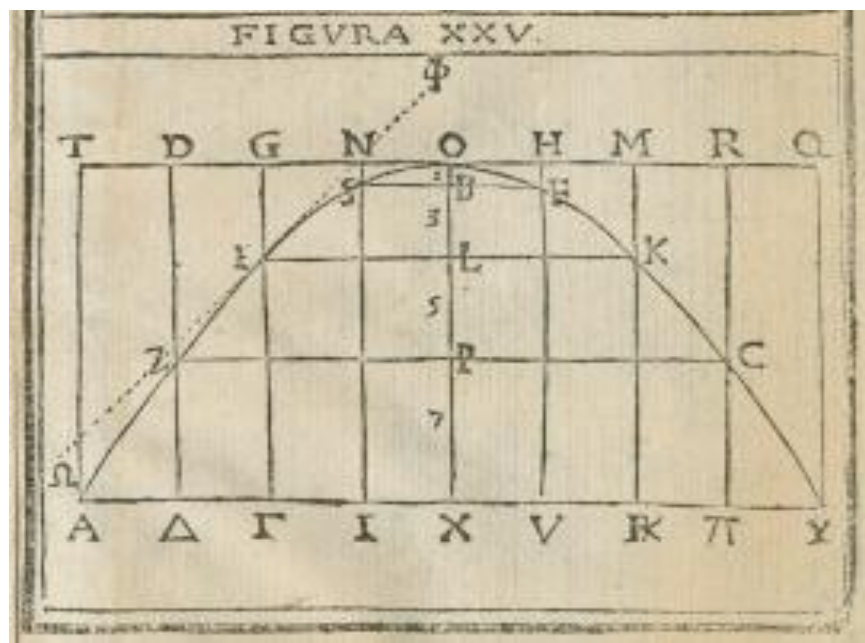
Задача о полете снаряда. Геометрическое решение.



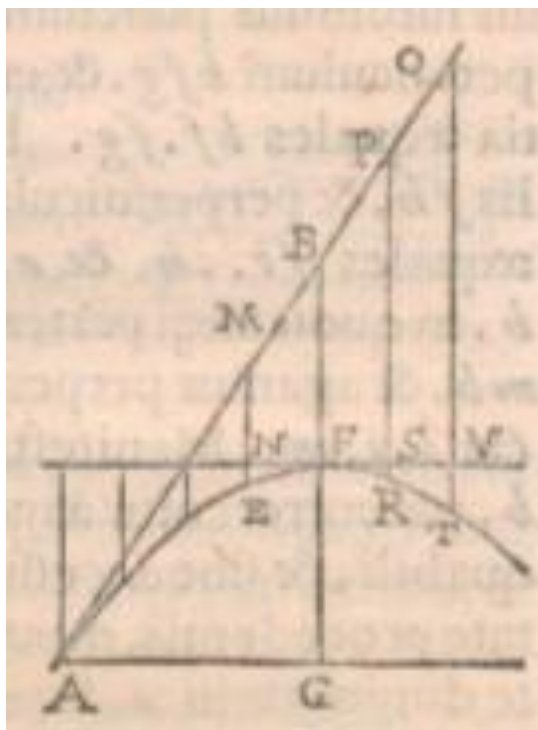
Т. Гарриот (ок. 1610)



Г. Галилей (1638)



Б. Кавальери (1632)



Э. Торричелли (1641)

Задача о движении тела в поле центральной силы. Геометрическое решение

Особые свойства компонент движения (по сравнению с движением в поле «плоской Земли»)

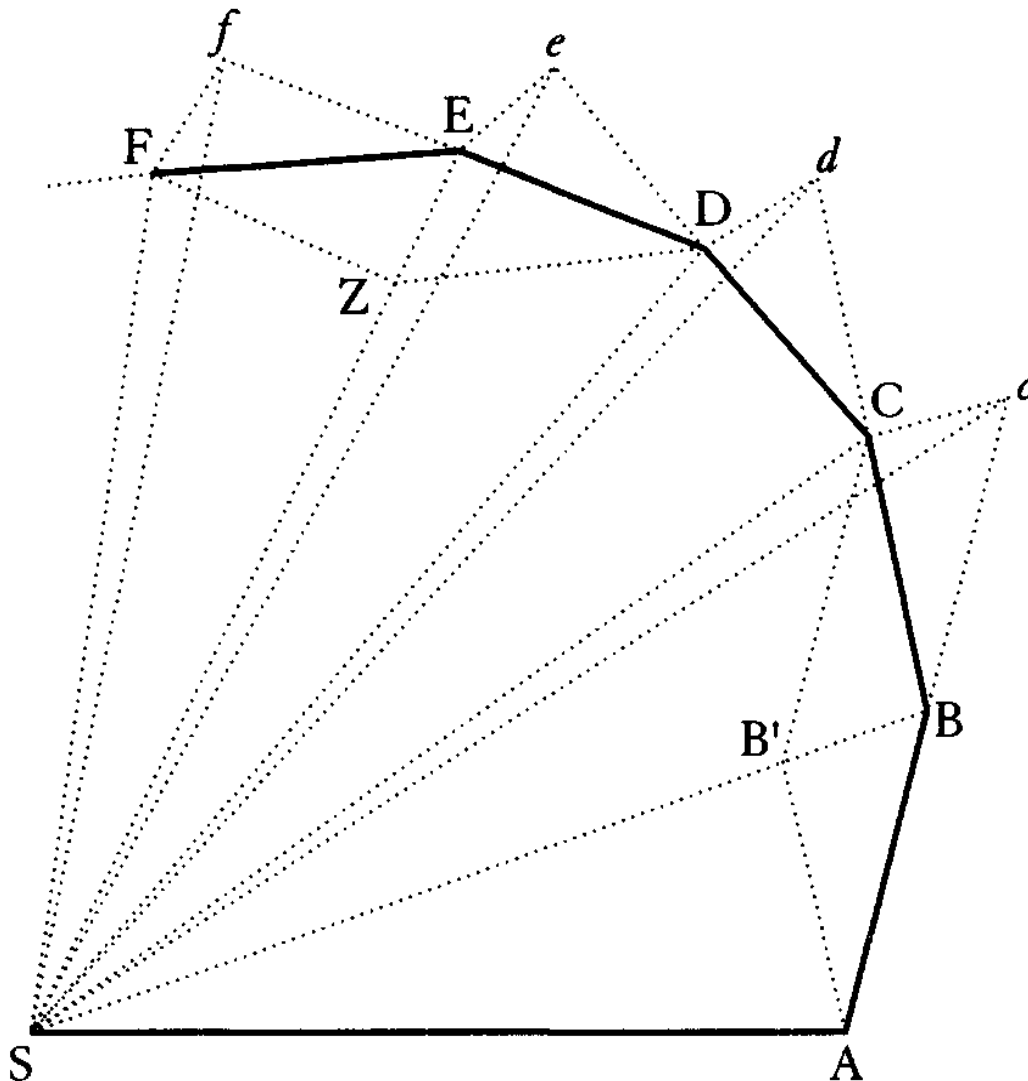
1. Инерциальная компонента изменяется по величине и направлению.

2. Компонента равноускоренного движения также изменяется по величине и направлению. При этом сохраняется ее ориентация на фиксированную точку – центр силы.

3. Компоненты движения рассматриваются локально, то есть, в течение бесконечно малого промежутка времени. Результатом перемещения в течение малого времени является малая величина – диагональ параллелограмма. Траектория всего движения выстраивается строится в форме ломаной, состоящей из результирующих малых перемещений.

4. Итоговая кривая получается спрямлением этой ломанной при условии устремления к нулю малых интервалов времени.

Движение в поле центральной силы. Закон площадей.
«Прекрасная теорема Ньютона о площадях» (Лагранж)



Обобщение 2-го закона Кеплера

«Площади, описываемые радиусами, проводимыми от обращающегося тела к неподвижному центру сил, лежат в одной плоскости и пропорциональны временам описания их».

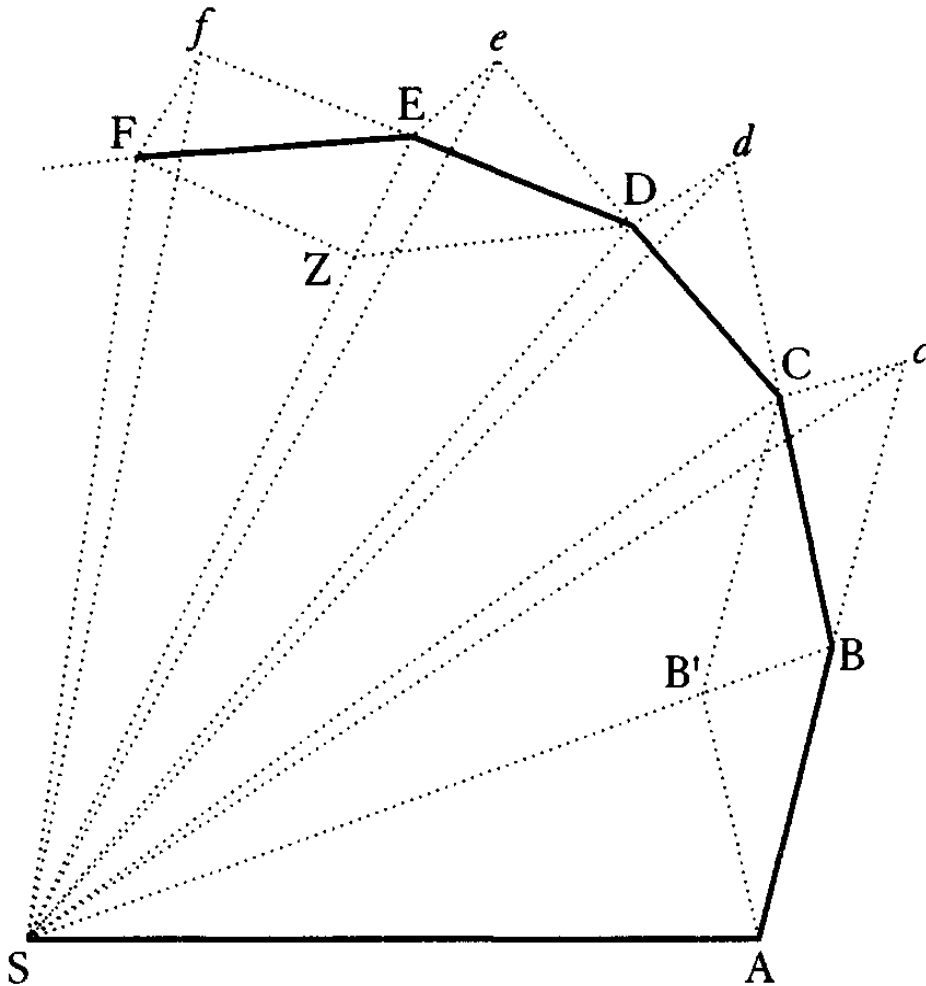
И. Ньютон, «Математические начала натуральной философии» (1687). Предложение 1.

Доказательство закона площадей (этап 1)

Время движения разбивается на малые промежутки Δt равной величины. Весь путь также представляют как сумму путей, проходимых за эти промежутки. Пусть в первый промежуток времени Δt тело прошло отрезок AB . Предположим, что сила притяжения отсутствует.

Тогда в следующий промежуток Δt тело попадет в точку c , расположенную на продолжении отрезка AB . Поскольку движение происходит с постоянной скоростью, $Bc' = AB$.

Очевидно, что площади
треугольников ASB и BSc ,
описываемых радиусами, равны.

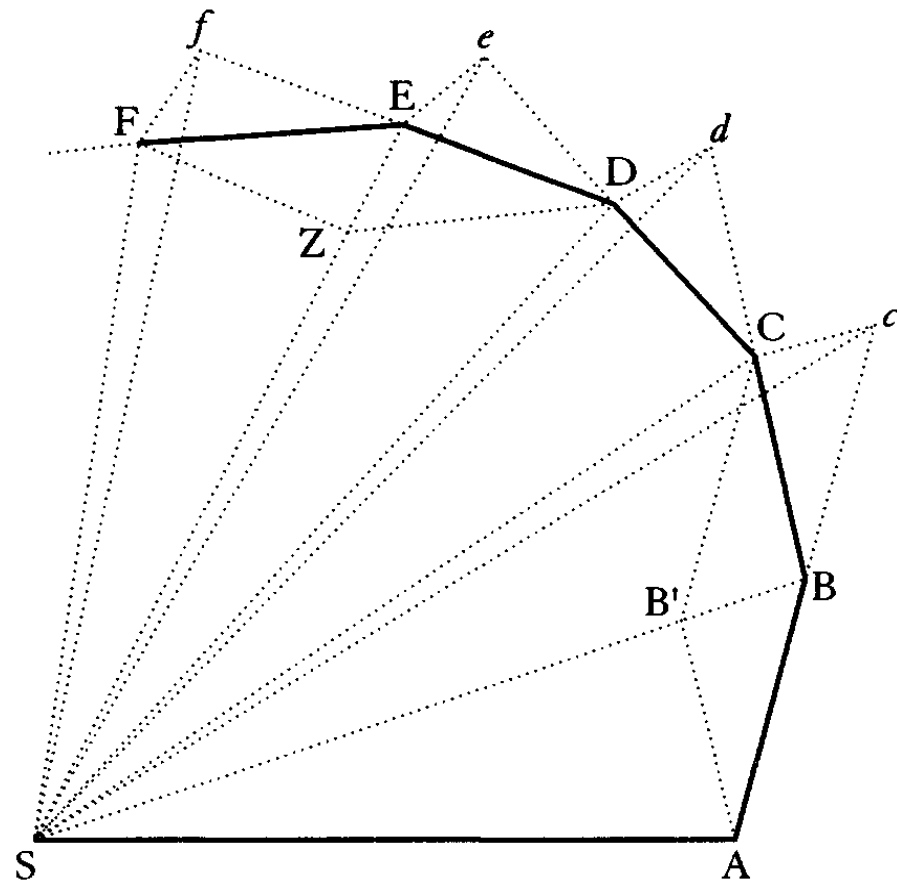


Доказательство закона площадей (этап 2)

На самом деле, когда тело попадает в точку B , на него «одним большим натиском» действует центростремительная сила. Вследствие чего тело отклоняется от Bc и следует по отрезку BC – диагонали параллелограмма $BcCB'$, сторона которого $B'B$ представляет перемещение точки B под действием силы.

Очевидно, что площади треугольников SCB и ScB равны. Откуда следует, что площадь SCB равна площади SAB .

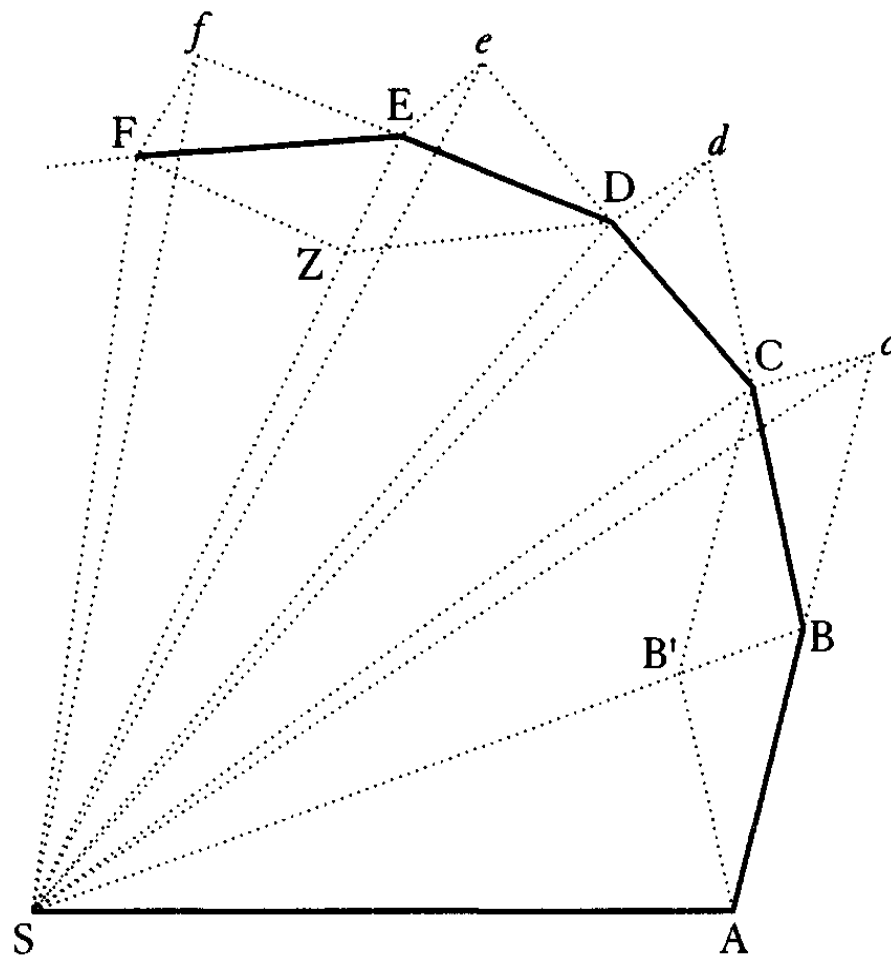
Продолжая построение, приходим к выводу, что площади треугольников, описываемых радиусами за малые промежутки времени, равны.



Доказательство закона площадей (этап 3)

Окончание доказательства:

«Увеличивая число треугольников и уменьшая их высоту бесконечно, получим, что в пределе периметр $ABCD$ будет кривой линией», удовлетворяющей свойству сохранения площадей, описываемых радиусом за равные промежутки времени.



КНИГА I. «О ДВИЖЕНИИ ТЕЛА» (В ПУСТОТЕ). ПРОДОЛЖЕНИЕ

Предложение 2 (теорема, обратная к закону площадей).

«Если тело движется по какой-либо плоской кривой так, что радиусом, проведенным к неподвижной точке или к точке, движущейся равномерно и прямолинейно, описываются площади, пропорциональные времени, то это тело находится под действием центростремительной силы, направленной к сказанной точке».

В предложениях 11, 12, 13 Ньютон доказывает, что при движении тела по эллиптической, гиперболической и параболической орбите центростремительная сила направлена к фокусу соответствующей кривой, а ее величина обратно пропорциональна квадрату расстояния до фокуса.

«Следствие 1. Из этих трех предложений следует, что если какое-нибудь тело находится под действием центростремительной силы, обратно пропорциональной квадратам расстояний до центра, то это тело будет двигаться по коническому сечению, фокус которого лежит в центре сил, и наоборот».

КНИГА I. «О ДВИЖЕНИИ ТЕЛА» (В ПУСТОТЕ). ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой книге «Начал» Ньютон решает также серию задач о невозмущенном движении планеты (кометы) под действием силы притяжения, обратно пропорциональной квадрату расстояния между телами. Он находит коническое сечение, проходящее через несколько заданных точек. Эти задачи имели прямое отношение к проблеме определения орбит небесных тел по нескольким наблюдениям.

Кроме того, Ньютон рассматривает движение планеты под действием возмущающих сил притяжения со стороны соседней планеты, ставит задачу трех и более взаимодействующих тел (отдел XI).

В XII и XIII отделах он занимается разработкой основ теории притяжения сферических тел. Сначала ставится и решается задача о притяжении точки сферическим телом с плотностью, зависящей от радиуса. Затем рассматривается притяжение двух сфер, которое сводится к притяжению их центров масс.

Из задач технического характера решаются задачи о колебании маятников в среде без сопротивления (по окружности, циклоиде и на сфере).

КНИГА II. «О ДВИЖЕНИИ ТЕЛА» (ПРИ НАЛИЧИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ)

Вторая книга «Начал» называется так же, как и первая: «О движении тел»; отличие — в характере задач, так как движение рассматривается в среде, оказывающей сопротивление. Поэтому большая часть книги посвящена вопросам гидромеханики.

Главная цель, которую ставит перед собой Ньютон в этой книге, состоит в опровержении вихревой гипотезы Декарта; он доказал, что если бы космическое пространство было заполнено некоторой материальной средой, то она оказывала бы сопротивление движению тел. Тогда (точный расчет это доказывал) траектории планет не были бы замкнутыми (отдел IV). Но планеты движутся по эллипсам, что подтверждено наблюдениями. Следовательно, рассуждал Ньютон, мировое пространство пусто, гипотеза вихрей неверна.

В *четвертом* отделе исследуется круговое движение тела в сопротивляющейся среде. В пятом отделе, посвященном гидростатике, выводятся ряд свойств несжимаемой жидкости. Исследуются свойства сжимаемой жидкости, плотность которой пропорциональна давлению (закон Бойля — Мариотта).

КНИГА II. «О ДВИЖЕНИИ ТЕЛА» (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

Большой интерес представляет *шестой* отдел, в котором Ньютон исследует качание маятника в сопротивляющейся среде.

Прежде всего, Ньютон указал здесь на возможность определять с помощью колебаний характеристики сопротивления среды.

Другой, более важной стороной этой проблемы был вопрос об установлении пропорциональности веса и массы. Ньютон описывает свои опыты с качаниями маятников, грузы которых были: в одном случае из дерева, в другом – из золота, затем – из свинца. Он приходит к выводу, что вес тел пропорционален массе, независимо от формы и химического состава тел.

В *седьмом* отделе изучается механизм сопротивления и влияние формы тела на сопротивление, которое оказывает жидкость на движение тел.

Восьмой отдел посвящен изучению волнового движения в средах, в частности, распространению звуковых волн в воздухе.

ПРИНЦИП КРУГОВОЙ ИНЕРЦИИ

У НЬЮТОНА

И. НЬЮТОН. ЗАКОН ИНЕРЦИИ. «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ»

1. *Прямолинейная инерция:*

«Закон 1. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз».

2. *Круговая инерция*

«Волчок, коего части, вследствие взаимного сцепления, отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестает вращаться (равномерно), поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха. Большие же массы планет и комет, встречая меньшее сопротивление в свободном пространстве, *сохраняют* свое как поступательное, так и *вращательное движение* в продолжение гораздо большего времени».

КРУГОВАЯ ИНЕРЦИЯ В НАБРОСКАХ К «МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАЧАЛАМ НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ»

1. MS. V.

«§ 8. Всякое тело сохраняет одно и то же реальное количество *кругового движения* и [одну и ту же] скорость до тех пор, пока ему не противостоят другие тела».

“§ 8. Every body keeps the same reall quantity of circular motion and velocity so long as tis not opposed by other bodies.”

2. MS. Ха (Определения и законы движения)

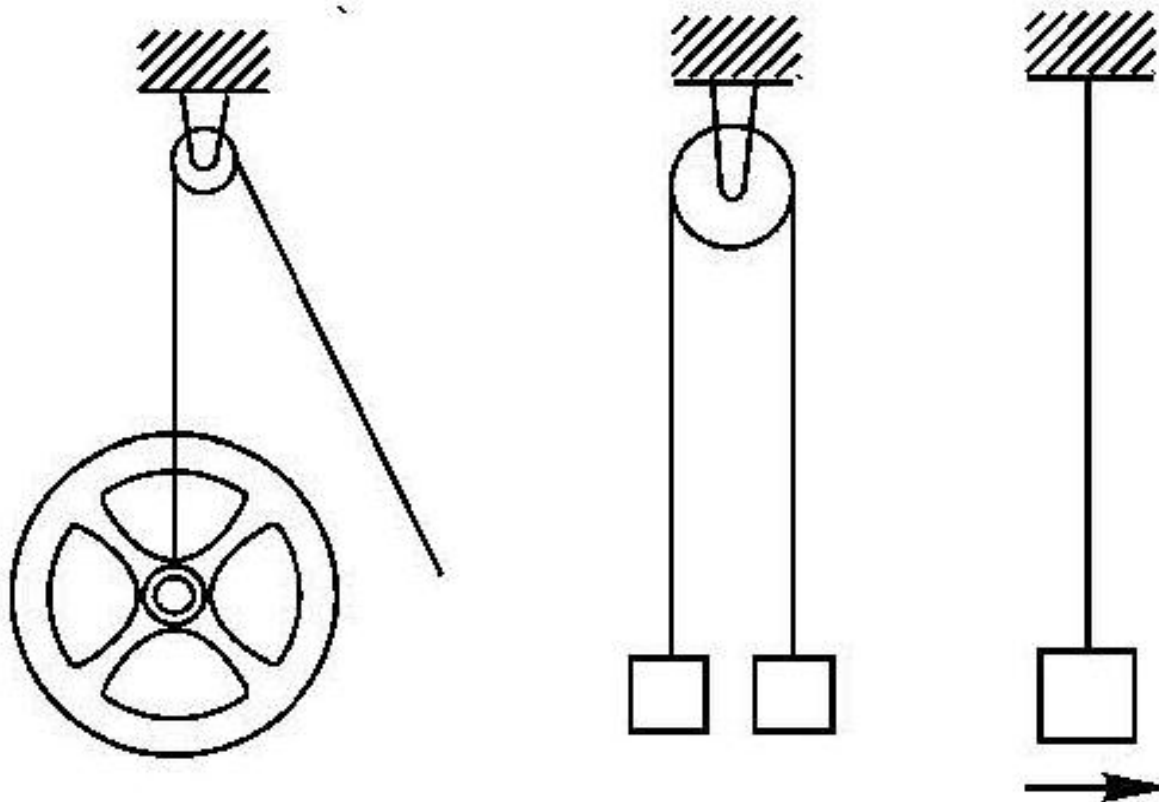
«Закон 1. Своей врожденной силой (*vi insita*) всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами (*viribus impressis*) изменять это состояние. Но само это равномерное движение – двойственно: *поступательное движение по прямой линии*, которую описывает центр тела своим равномерным перемещением, и *круговое движение* вокруг любой из своих осей, которая либо покоится, либо перемещается равномерно, оставаясь всегда параллельной своему начальному положению».

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИСТОКИ ИДЕИ КРУГОВОЙ ИНЕРЦИИ

Э. МАХ. «МЕХАНИКА. ИСТОРИКО- КРИТИЧЕСКИЙ ОЧЕРК ЕЕ РАЗВИТИЯ» (1883)

Вопрос о происхождении понятия инерциальной массы

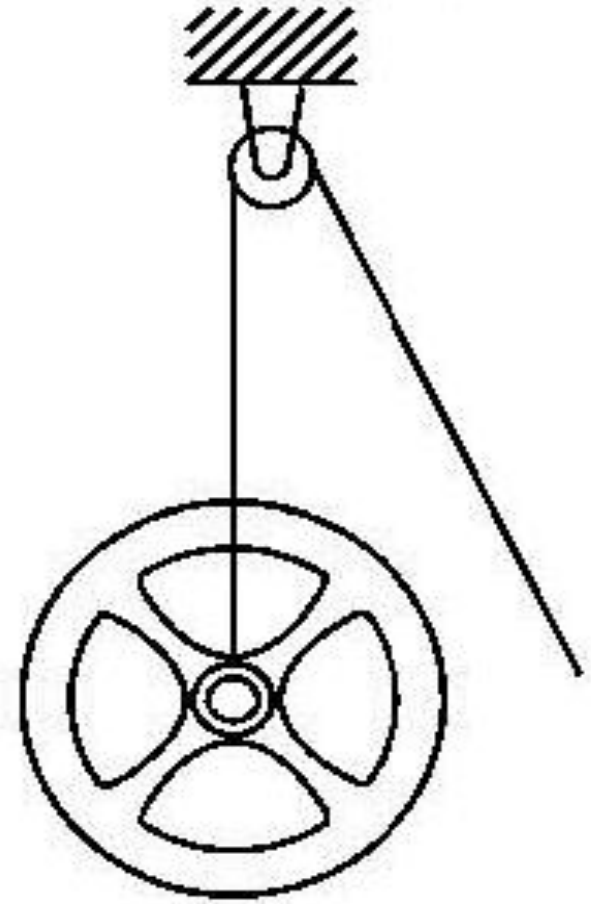
«Множество данных опыта, достаточное количество которых находилось в распоряжении Ньютона, ясно свидетельствует о существовании *определяющего движение признака*, отличного от веса тела».



ТЕХНИЧЕСКИЕ ИСТОКИ ПОНЯТИЯ ИНЕРЦИИ И ИНЕРЦИАЛЬНОЙ МАССЫ. МАХОВОЕ КОЛЕСО

«Если привязать веревку к массивному колесу, перебросить ее через блок и потянуть колесо вверх, мы почувствуем *вес* махового колеса. Но если поместить это колесо на возможно более цилиндрическую и гладкую ось и возможно лучше сбалансировать его, оно не будет уже, благодаря своему весу, занимать определенного положения. При всем том мы чувствуем огромное сопротивление, как только попытаемся привести колесо в движение или движущееся колесо остановить. Перед нами явление, которое дало повод для провозглашения особого свойства *инерции* или даже силы инерции...».

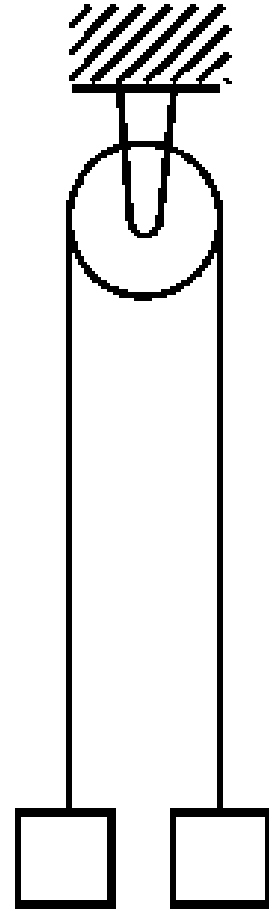
Э. Мах. «Механика»



ТЕХНИЧЕСКИЕ ИСТОКИ ПОНЯТИЯ ИНЕРЦИИ И ИНЕРЦИАЛЬНОЙ МАССЫ. ПРОТИВОВЕС

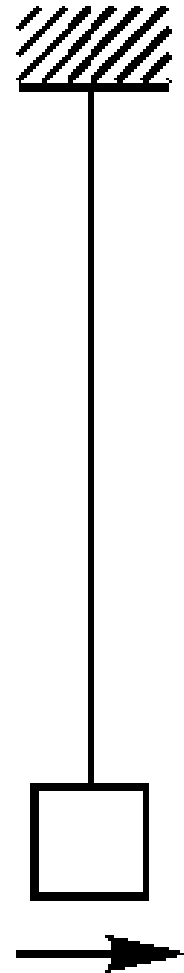
«Два равных груза, одновременно поднятых вверх, оказывают сопротивление поднятию своим весом. Если же к ним привязать за оба конца веревку и эту последнюю перебросить через блок, то они будут сопротивляться движению или скорее изменению скорости блока своей массой».

Э. Мах. «Механика»



ТЕХНИЧЕСКИЕ ИСТОКИ ПОНЯТИЯ ИНЕРЦИИ И ИНЕРЦИАЛЬНОЙ МАССЫ. МАХОВОЕ КОЛЕСО

«Большой груз, подвешенный на очень длинной нити в качестве маятника, может быть без труда удержан небольшим отклонением нити рядом с положением равновесия. Составляющая этого веса, которая гонит маятник в положение равновесия, очень мала. Тем не менее мы чувствуем значительное сопротивление, когда мы быстро двигаем груз или хотим задержать его движение. Груз, который едва носится воздушным шаром, оказывает всякому движению ощутимое сопротивление, несмотря на то, что вес его не должен уже быть преодолеваем. Если принять еще в соображение, что одно и то же тело на различных географических широтах ... получает весьма различные ускорения, мы должны будем признать массу признаком, определяющим движение и отличным от веса тела».



Э. Мах. «Механика»

РЕЗЮМЕ ИДЕИ Э. МАХА: ТЕХНИЧЕСКИЕ ИСТОКИ ПОНЯТИЯ (КРУГОВОЙ) ИНЕРЦИИ

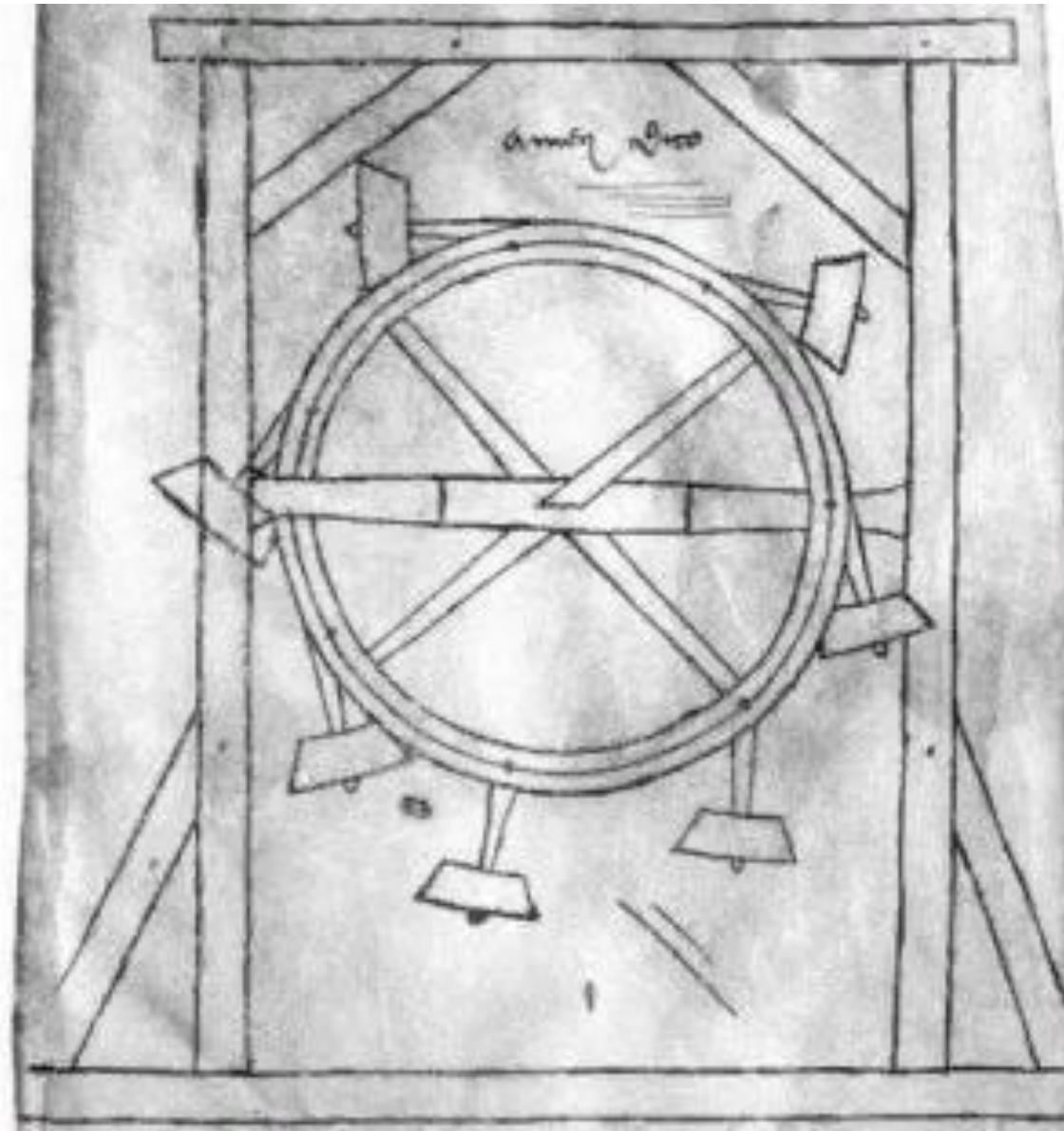
1. Почти все творцы науки Нового времени помимо классического принципа прямолинейной инерции принимали (в той или иной форме) принцип круговой инерции – положение о сохранении вращения или движения по окружности. При этом принцип круговой инерции нередко имел более фундаментальное значение, нежели принцип прямолинейной инерции (Галилей).

2. Это обстоятельство позволяет поставить вопрос о технических истоках понятия инерции. А именно, каковы технические предпосылки формирования понятия круговой инерции?

3. «Аргументом» в пользу принципа круговой инерции послужили движения-вращения маховых колес, противовесов и технических маятников.

МАХОВЫЕ ГРУЗЫ И МАХОВОЕ КОЛЕСО
АККУМУЛЯЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

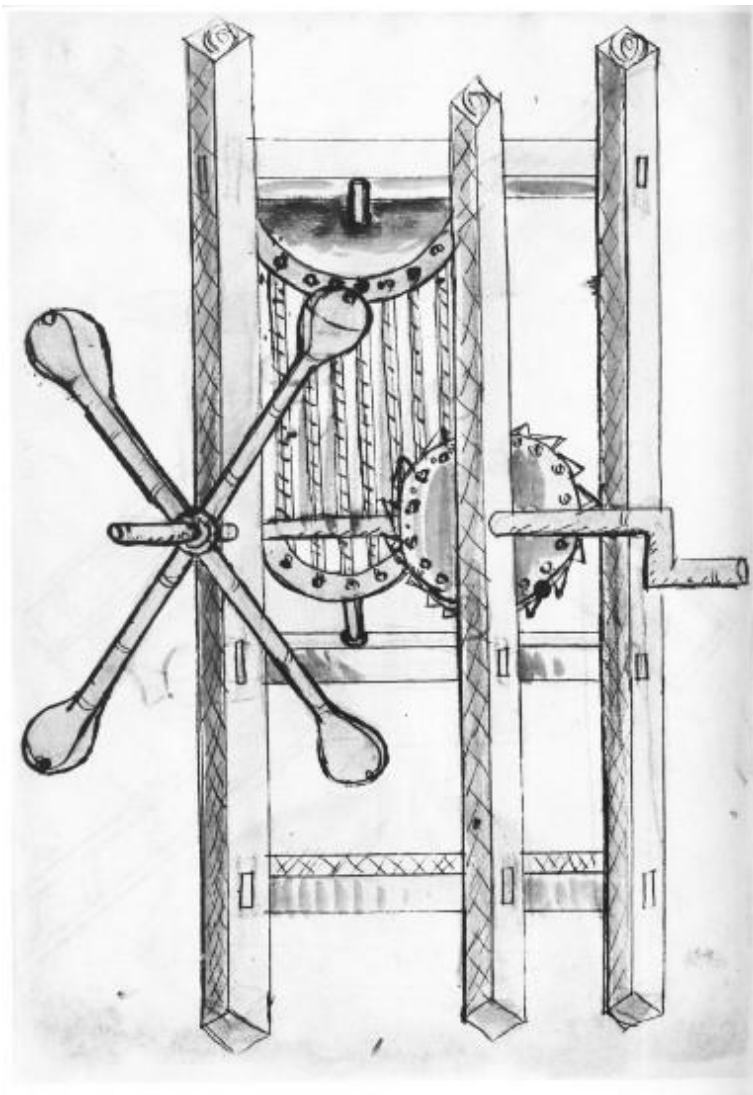
Маховые грузы.
Альбом Виллара де Оннекура (сер. XIII в.). «Вечный двигатель»



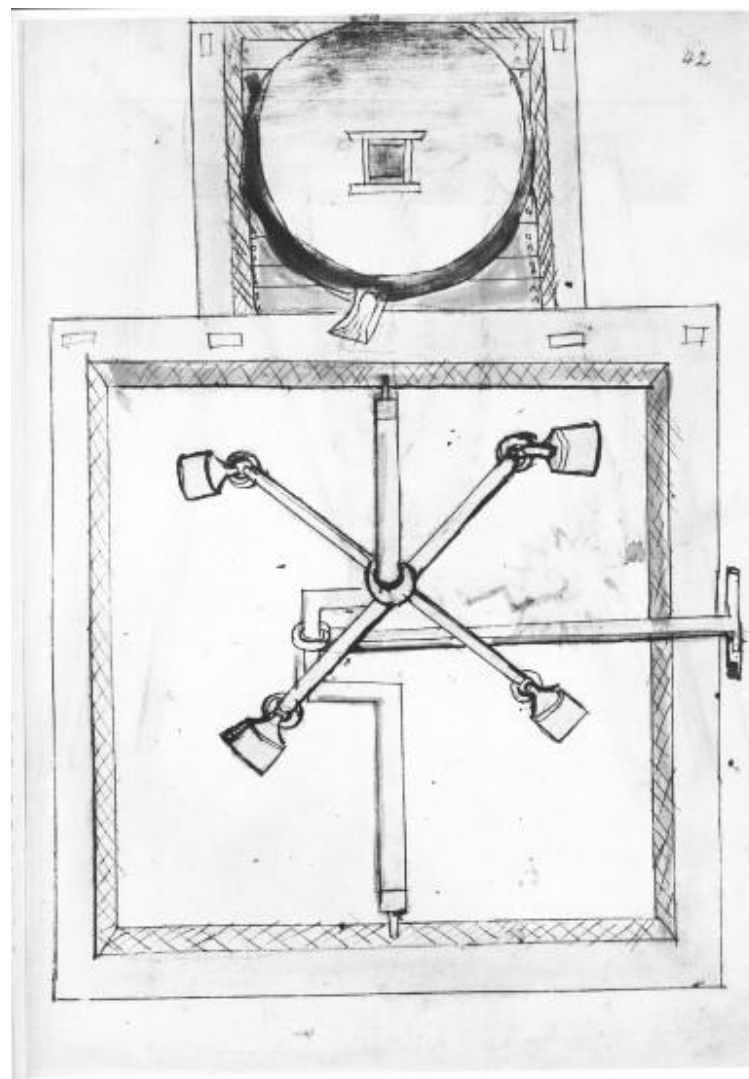
Маховые грузы

Анонимный технический альбом эпохи Гуситских войн (1475)

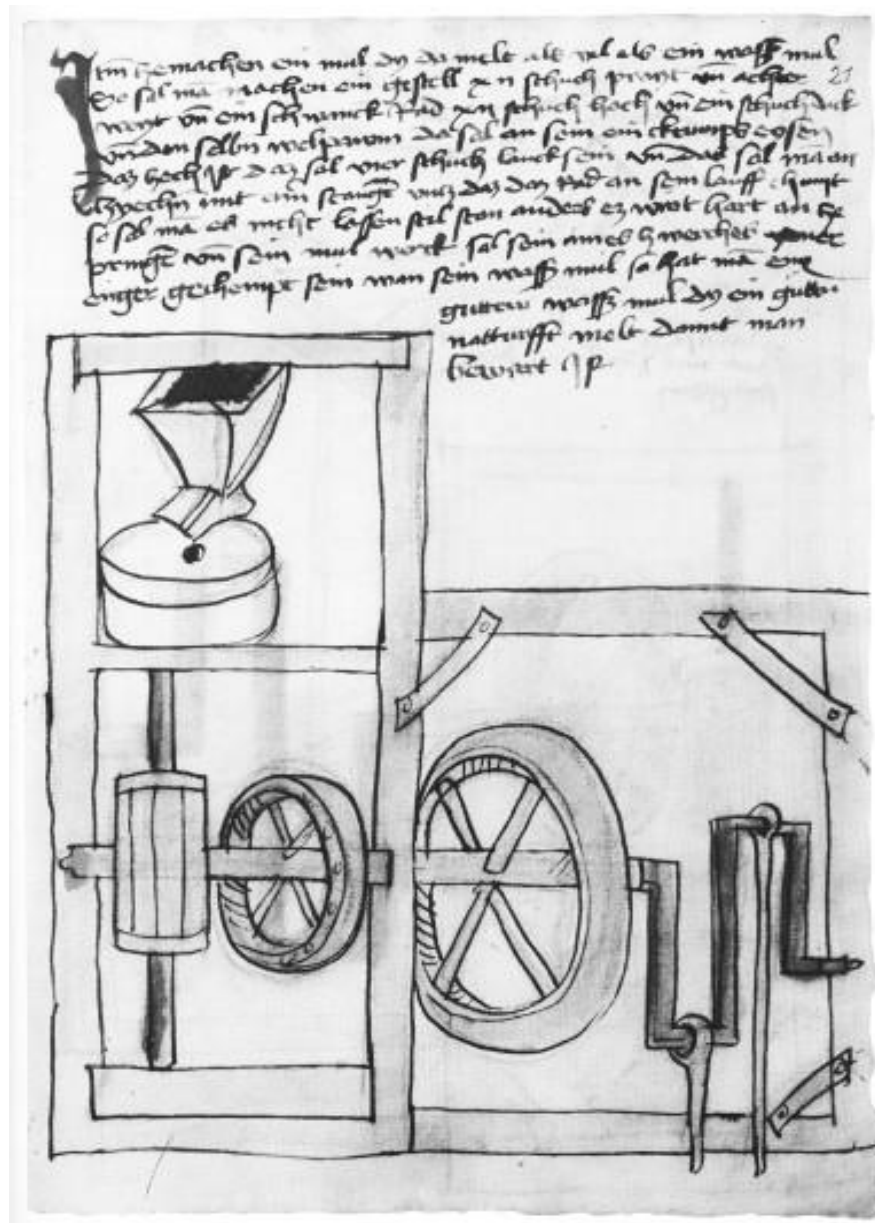
Передаточный механизм



Мельница (с жерновами)

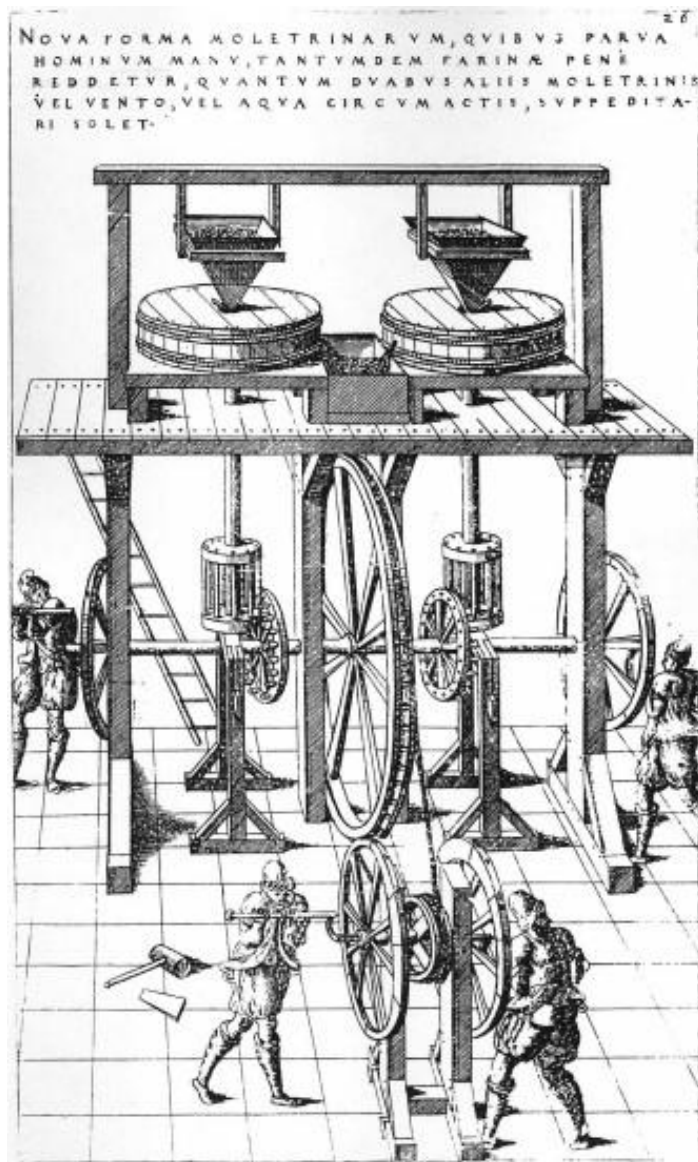


Маховые колеса в составе мукомольной мельницы
Анонимная техническая рукопись «эпохи Гуситских войн», ок. 1475

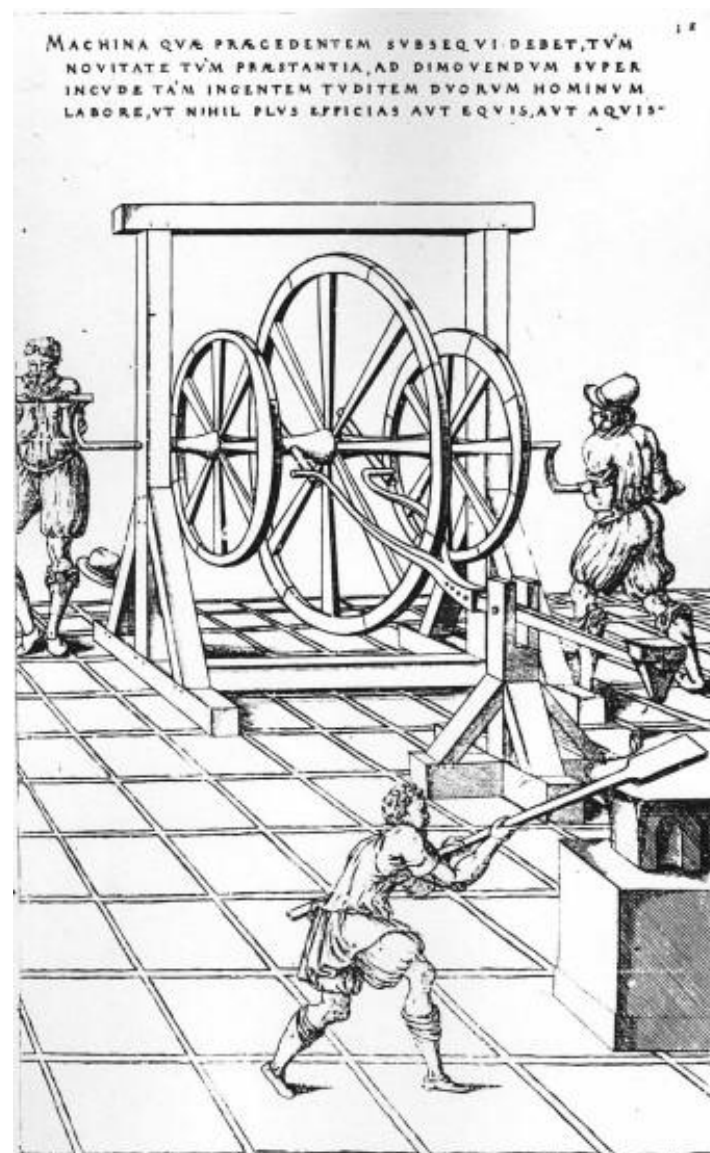


Маховые колеса. Jacques Besson, Theatrum instrumentorum et machinarum (1582)

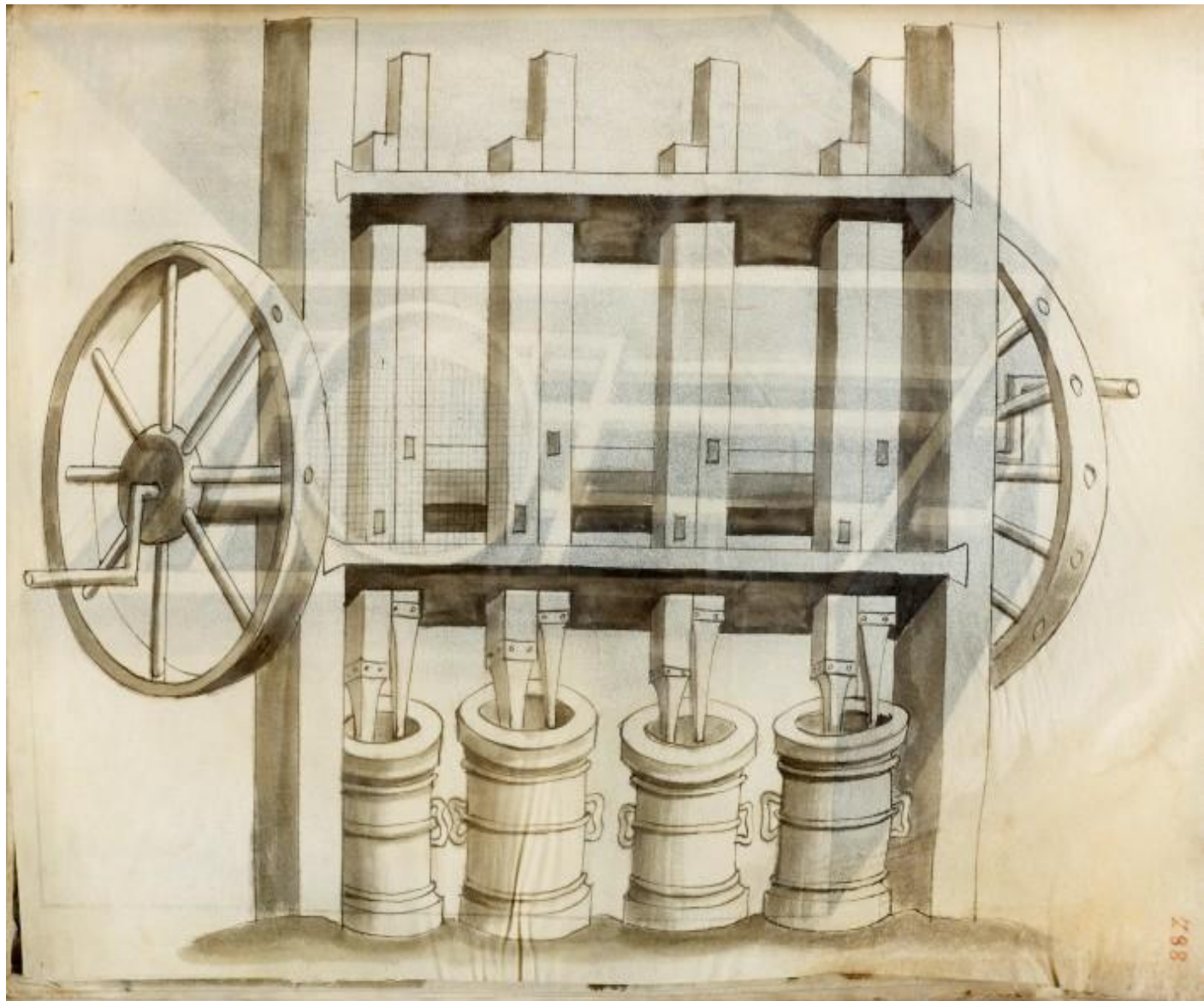
Мукомольная мельница



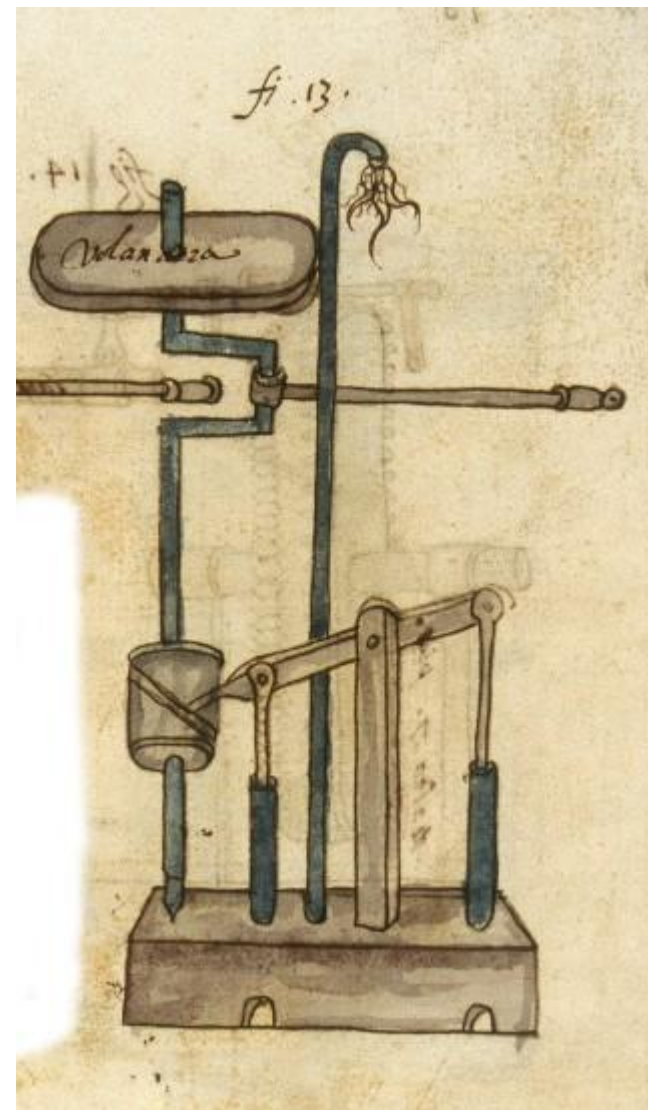
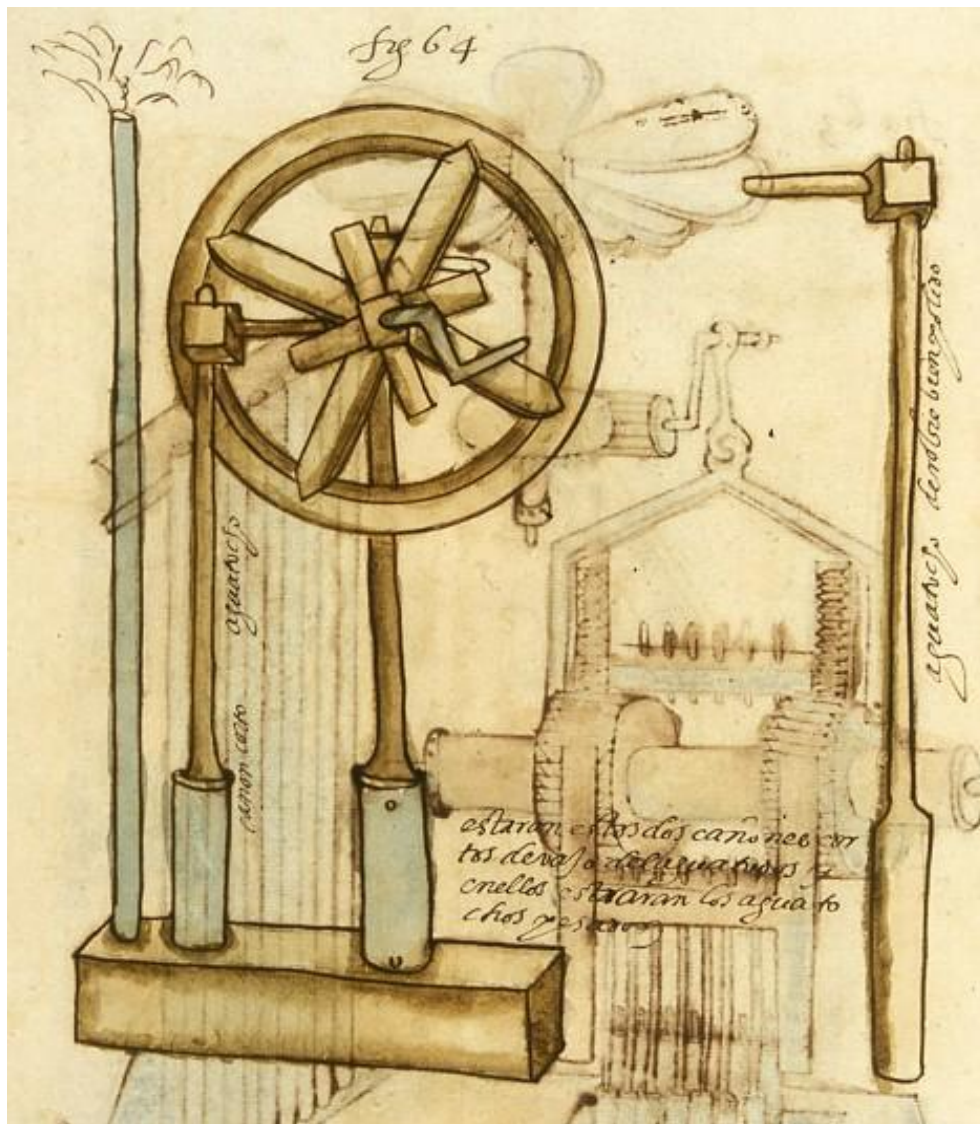
Кузнечный молот



Маховые колеса в составе толчеи для размолота пороха, руды и т.д.
Анонимный технический альбом, Weimer, ок. 1500



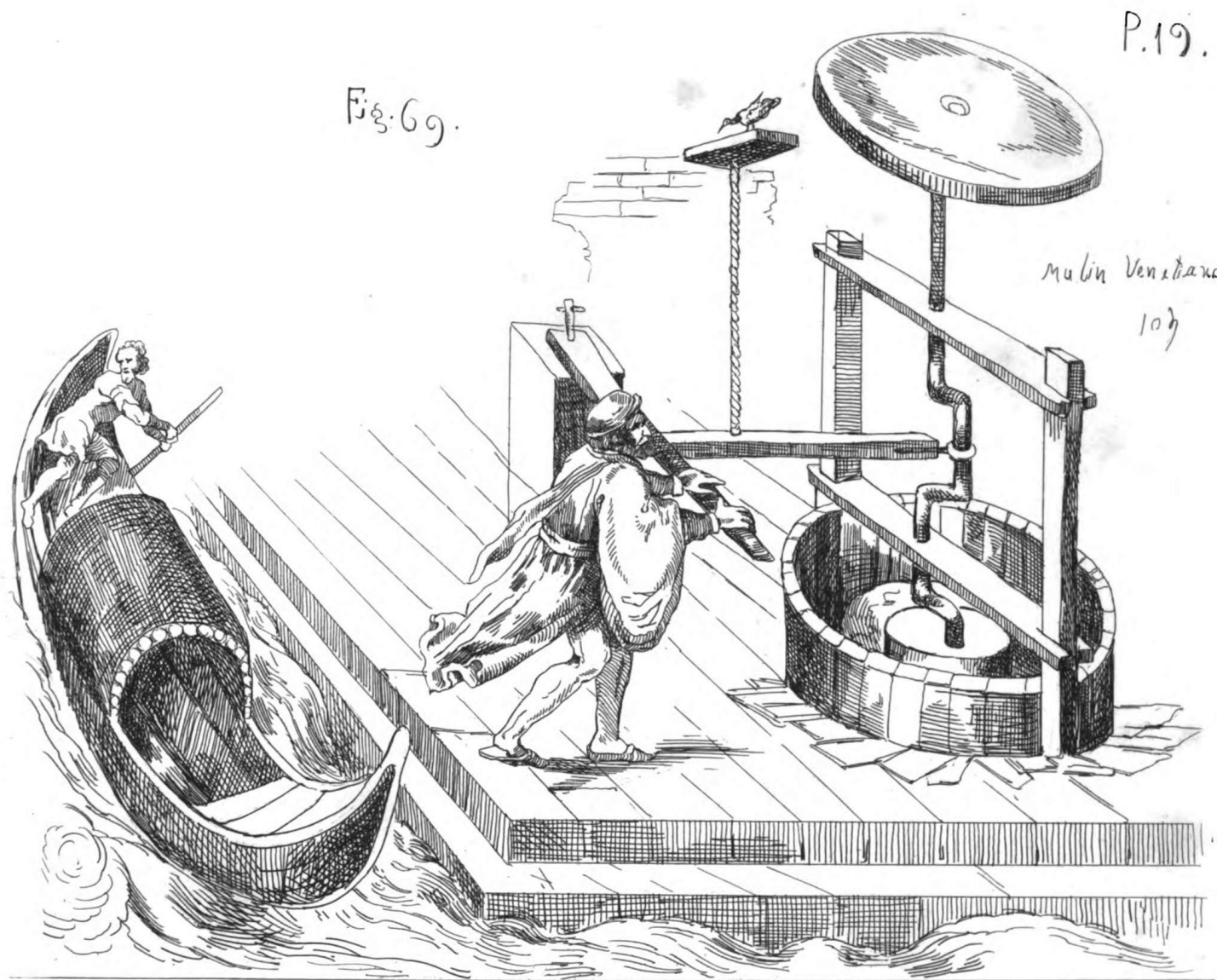
Нагнетательный насос с маховым колесом
Анонимная техническая рукопись. Севилья (ок. 1547)



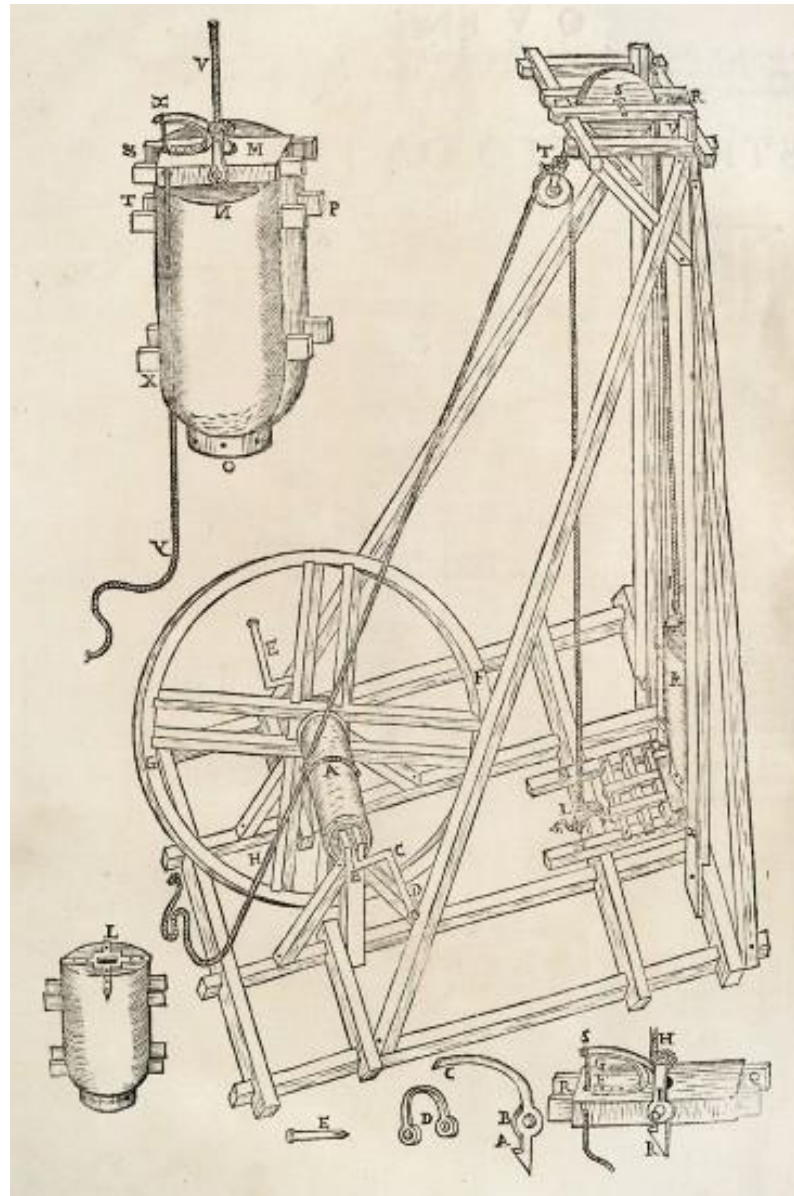
Ворот с маховым колесом для подъема руды из шахты
Григорий Агрикола, «О металлургии»
Gregorius Agricola, De re metallica (1556)



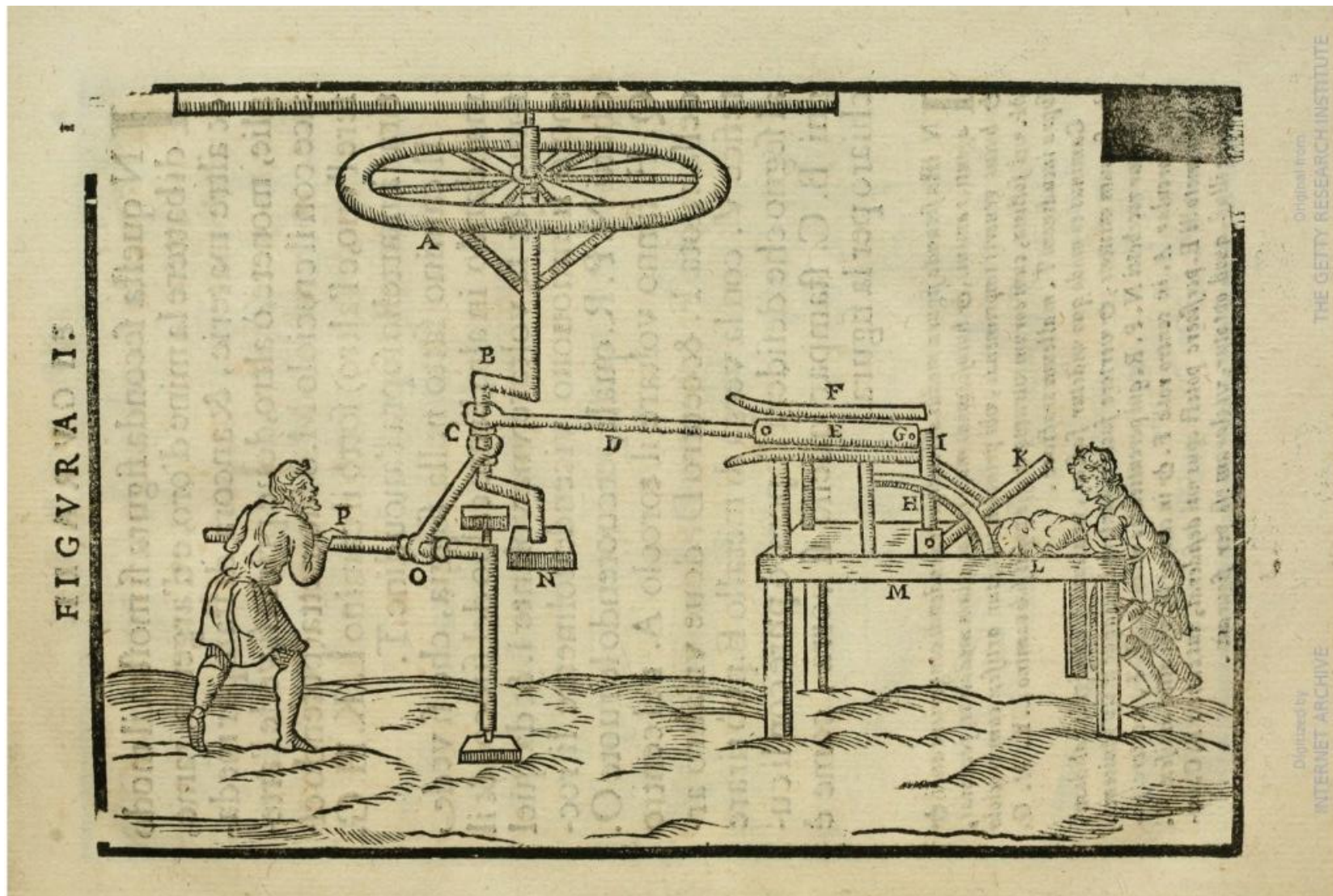
Ручная «мельница» с маховым колесом для замеса глины
Cipriano Piccolpasso, Les trois livres de l'art de potier (ca. 1550)



Копер с маховым колесом для забивки свай
Buonaiuto Lorini, Delle fortificationi (1596)

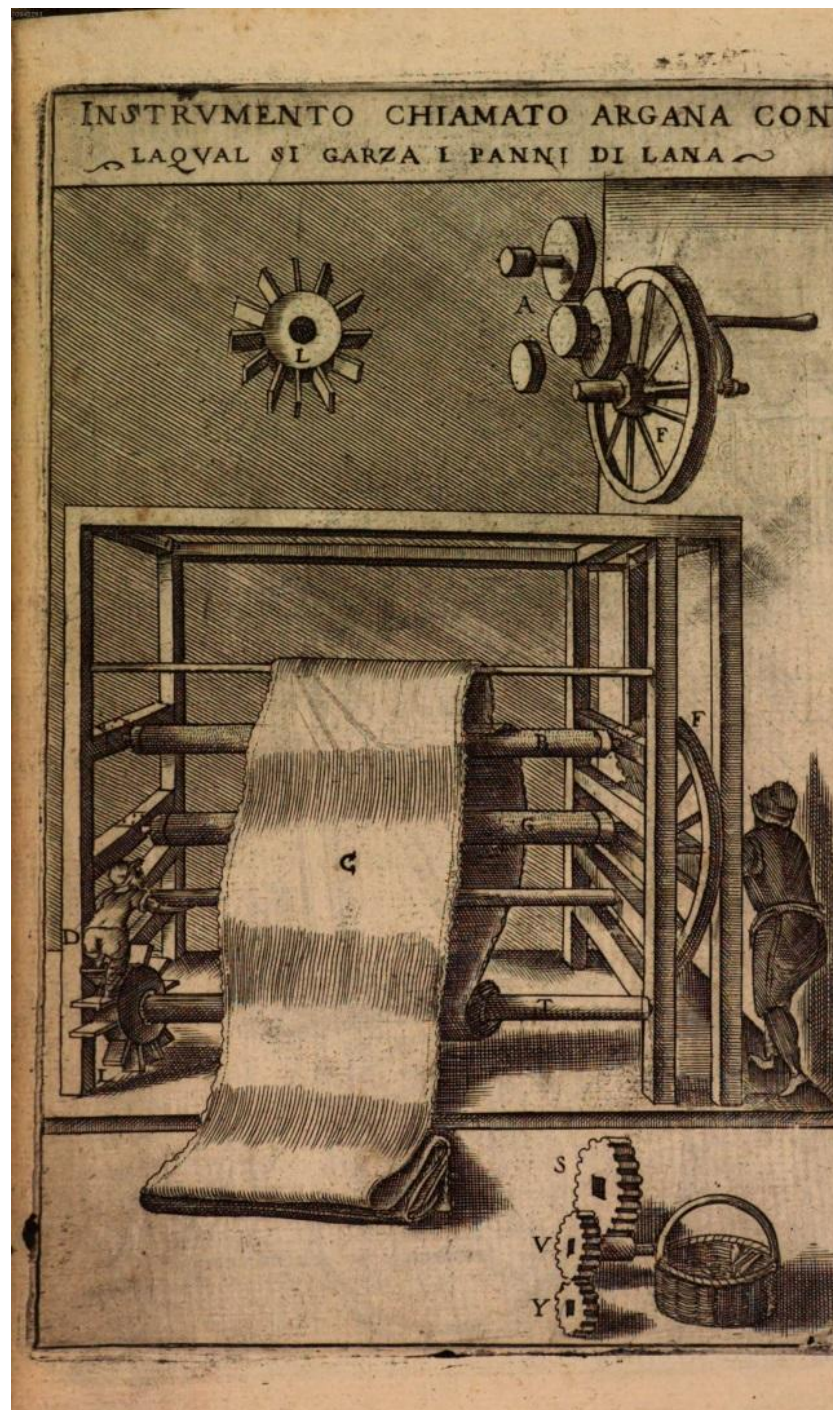


Тестомесильная машина с маховым колесом
Giovanni Branca, Le machine (1629)

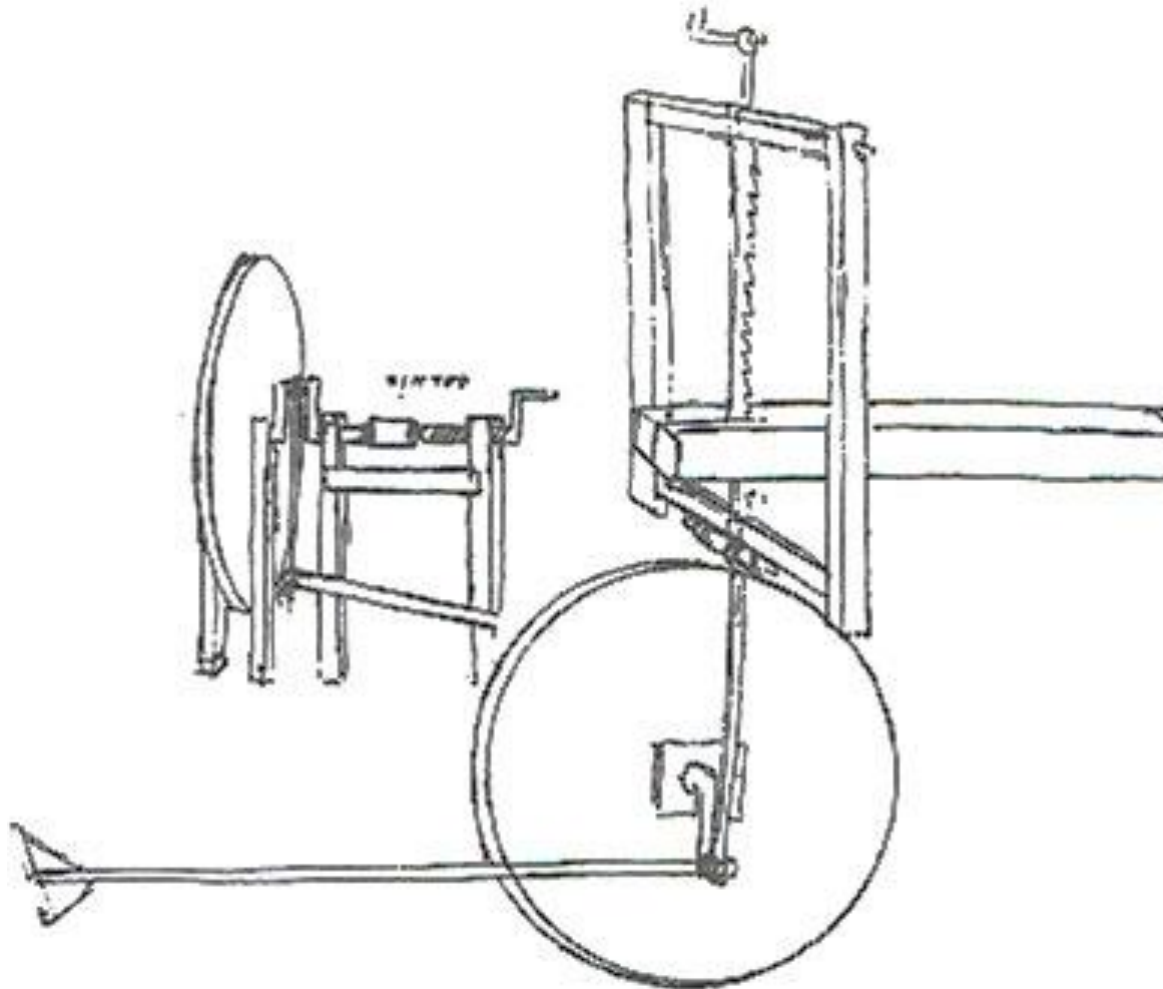


Машина для чесания шерстяных сукон
с маховым колесом

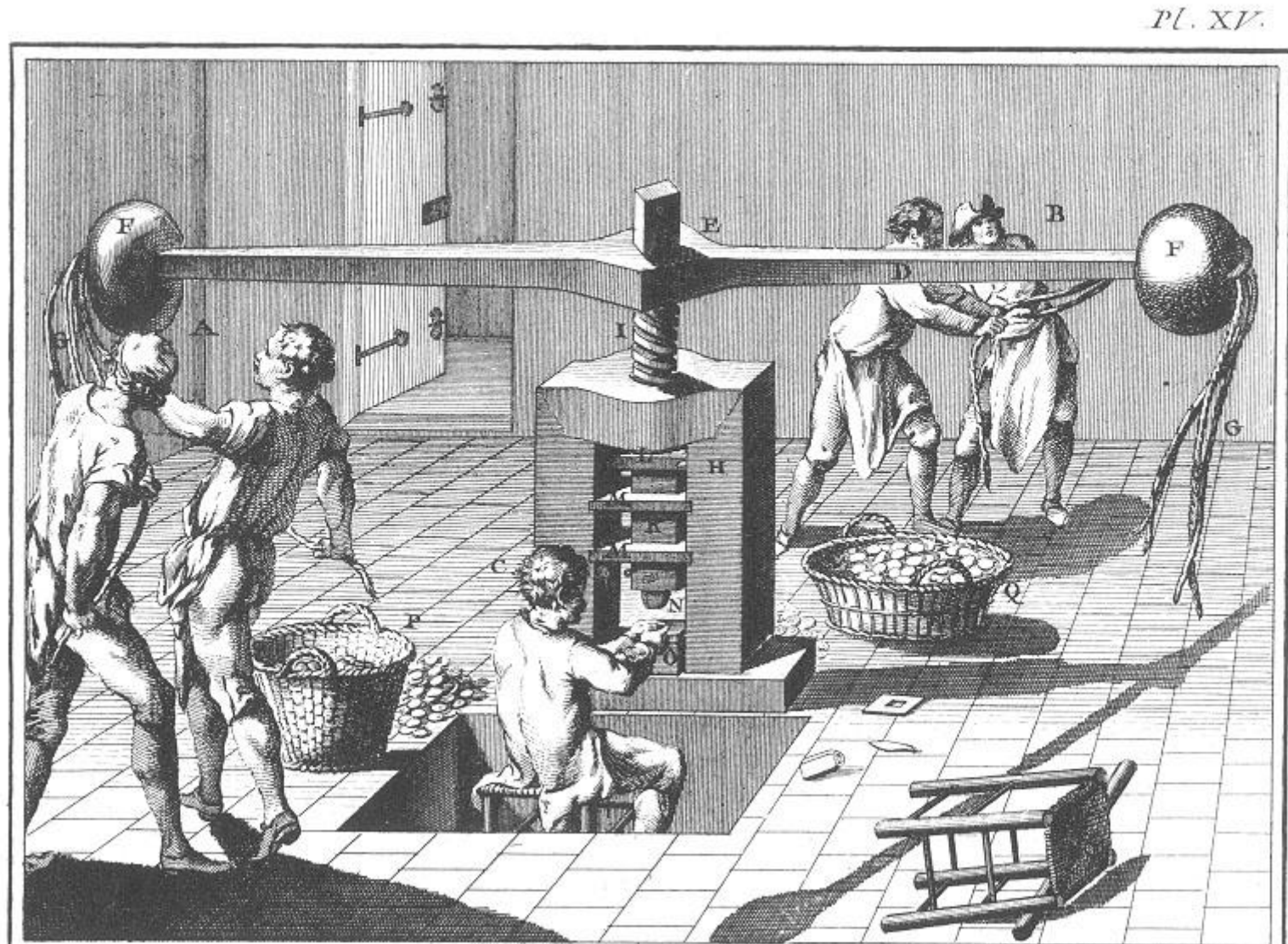
Vittorio Zonca
Novo Teatro di Machine
(1607)



Токарный станок и пилорама с маховым колесом
Леонардо да Винчи, Codex Atlanticus (ок. 1500)



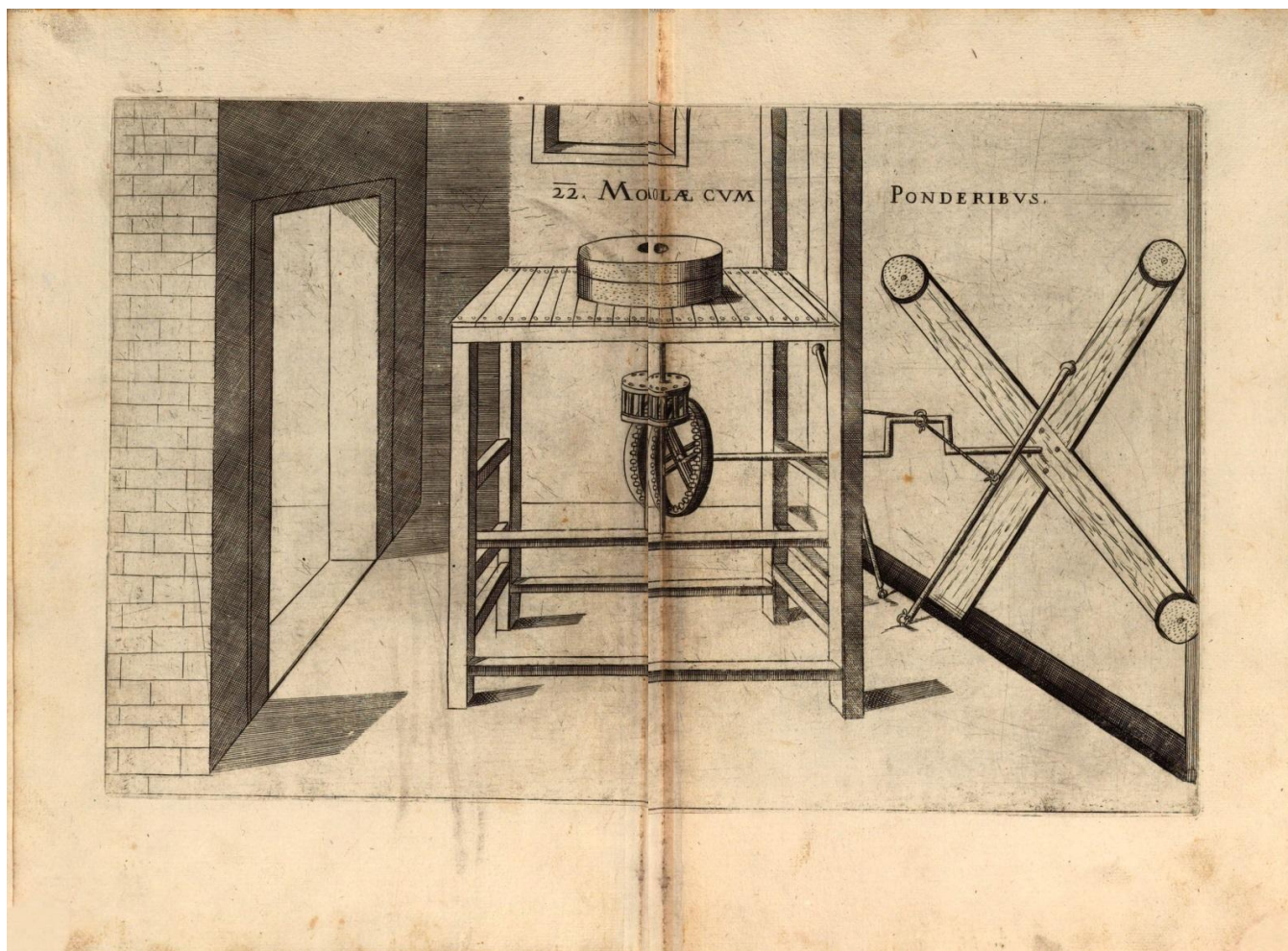
Станок для чеканки монет с маховыми грузами (XVIII в.)
Начало использования ок. 1550 г. Энциклопедия Дидро и Д'Аламбера (1771)
И. Ньютон – Директор Королевского монетного двора



Представление об экономии ручного труда. В терминах эпохи – создание дополнительной силы, увеличивающей силу работников.

«Но если колодец (шахта) очень глубокий, ворот вращают три человека, а работу четвертого выполняет колесо. Ибо, как только барабан приведен в движение, быстрое обращение колеса оказывает помощь, облегчая вращение барабана ворота. Иногда к колесу подвешиваются свинцовые грузы, или же они крепятся к спицам. Когда колесо вращается, грузы давят своим весом на спицы и тем самым увеличивают движение».





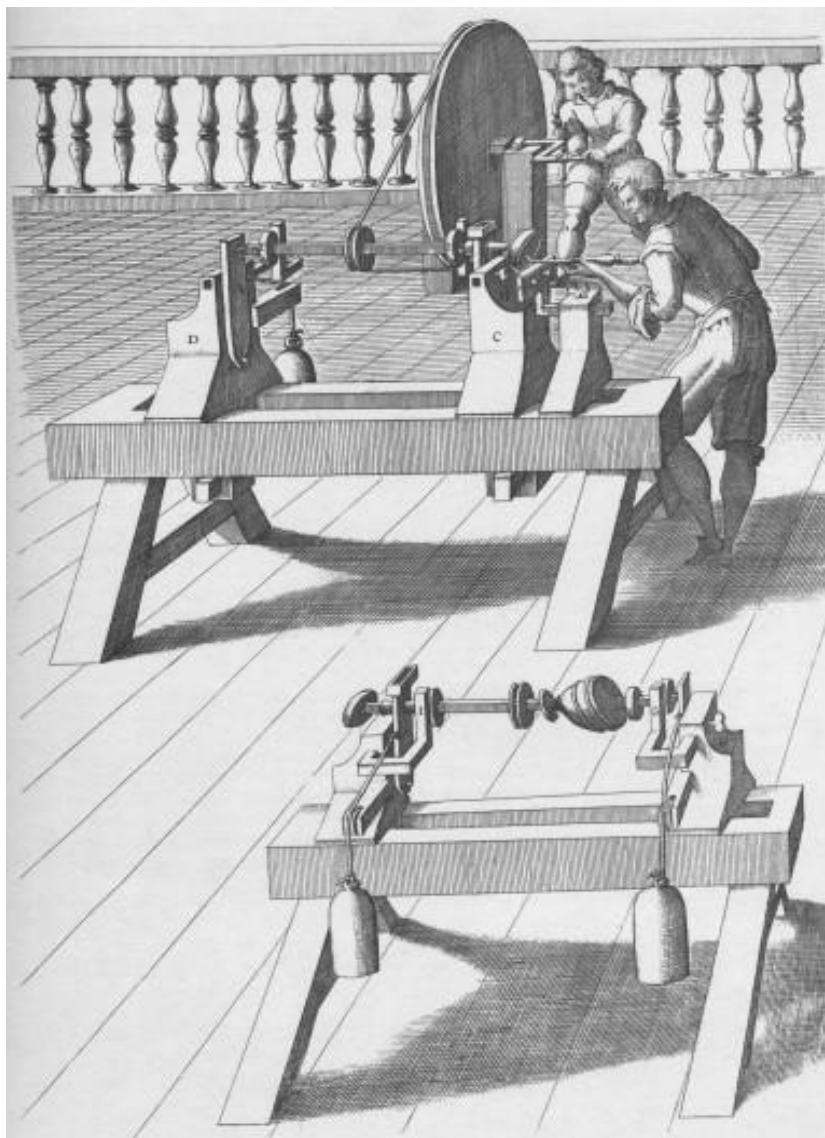
Fausto Veranzio. Machinae novae (1585). О мельницах с маховыми грузами

«Эти мельницы приводятся [в движение] одним или двумя людьми, и грузы, подвешенные к концу креста, *увеличивают мощность*. Вместо креста можно установить колесо и придать ему этот вес, но крест легче сделать, а результат получается такой же...»

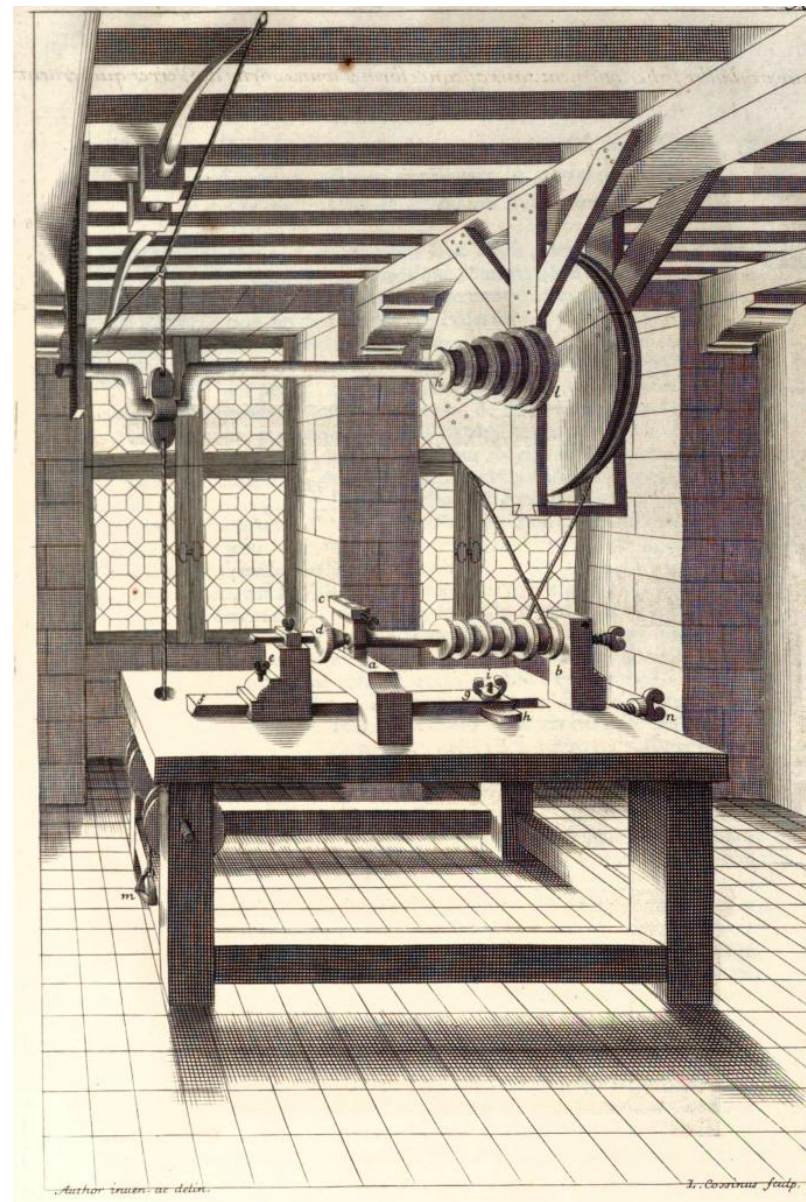
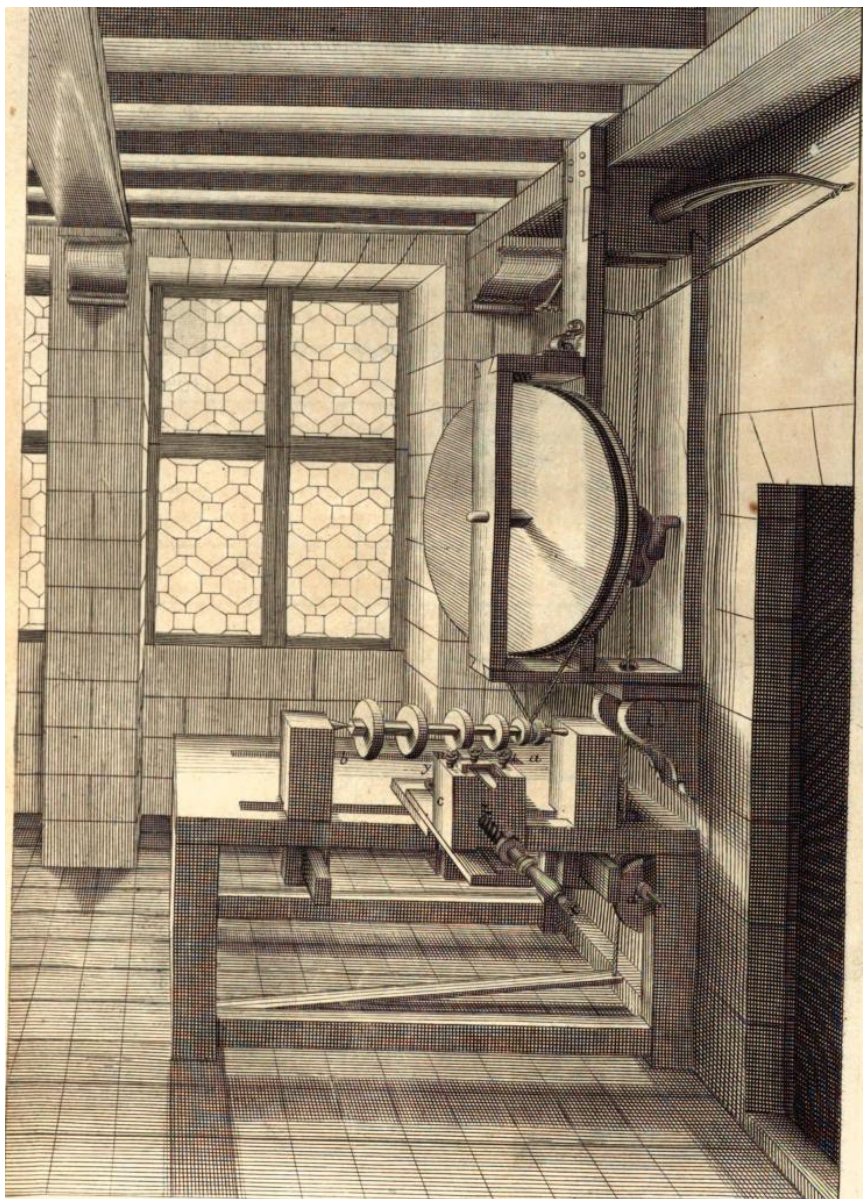
МАХОВОЕ КОЛЕСО – РЕГУЛЯТОР ВРАЩЕНИЯ

(создание равномерного вращения – первичная функция современного
махового колеса)

Токарный станок, котором маховое колесо выполняет также функцию привода
Salomon de Caus, Les raisons des forces mouvantes (1615)



Станки для шлифовки линз с маховым колесом
Cherubin d'Orlean, Dioptrique oculaire (1671)



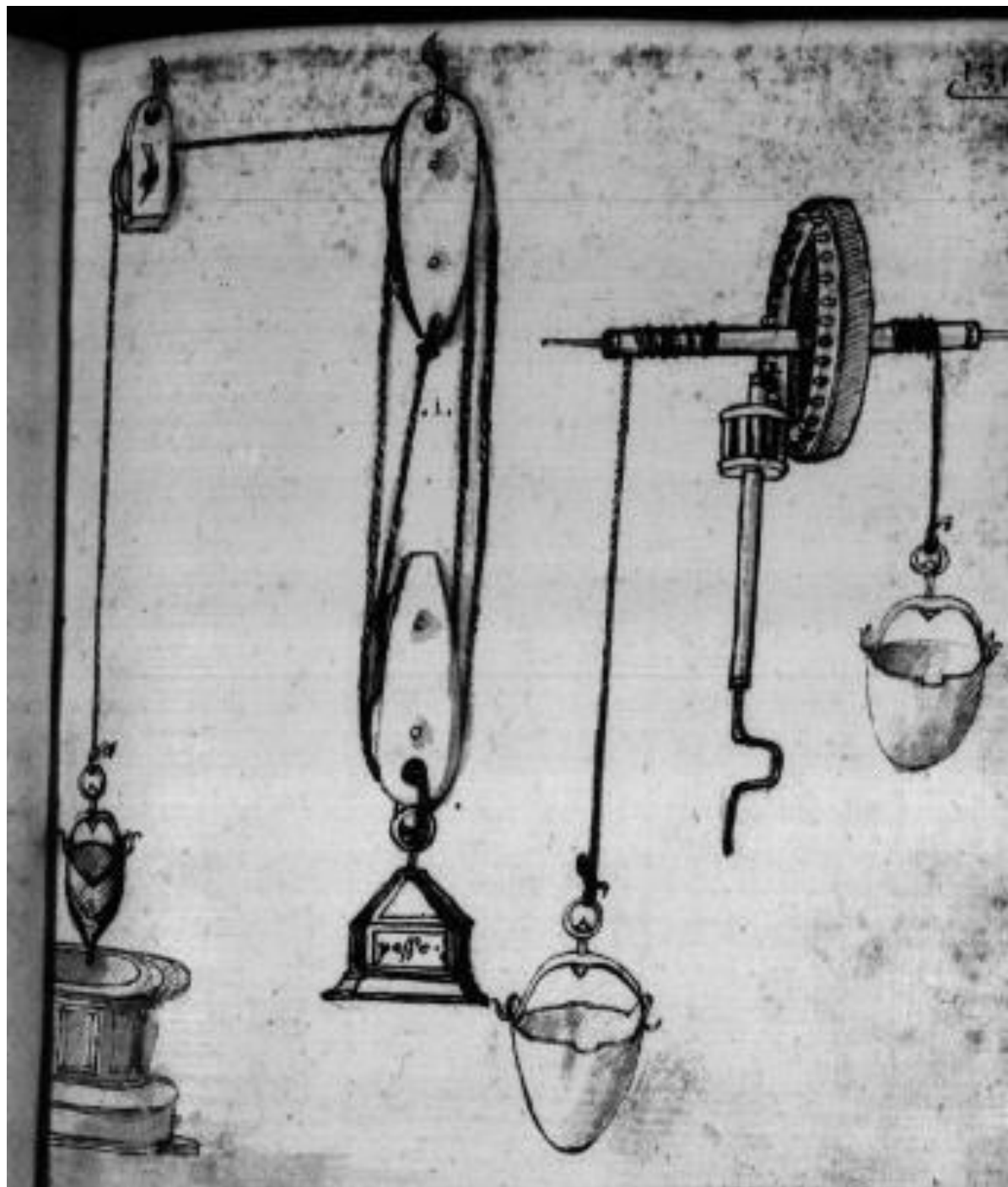
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТИВОВЕСОВ В ТЕХНИКЕ XV-XVI ВВ.
ПОДЪЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Иллюстрация к *Надписанию* Псалма 95:
«Хвала песни Давиду, внегда дом созидашеся по пленении...»
Хлудовская Псалтирь (ок. 850).



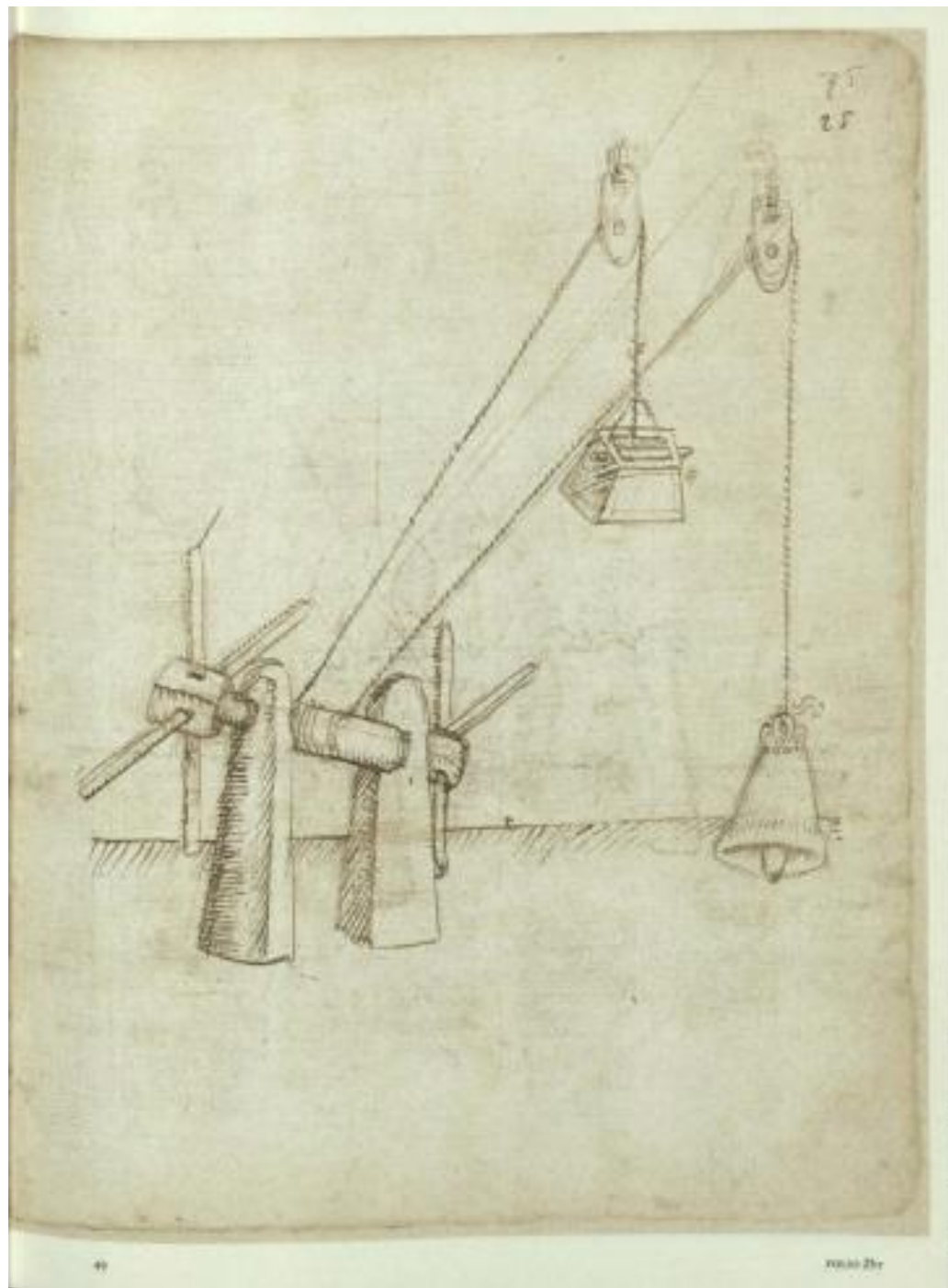
Полиспаст с противовесом
(рисунок слева).

Из записной книжки
инженера
Buonaiuto Ghiberti (XV в.)



Поднятие колокола при
помощи ворота и противовеса

Рисунок из записной книжки
инженера
Mariano Taccola (XV в.)



Подъемный механизм с противовесом.
Воспроизводит схему рычагов степенного полиспаста.
Jacques Besson. Theatrum instrumentorum et machinarum (1578)

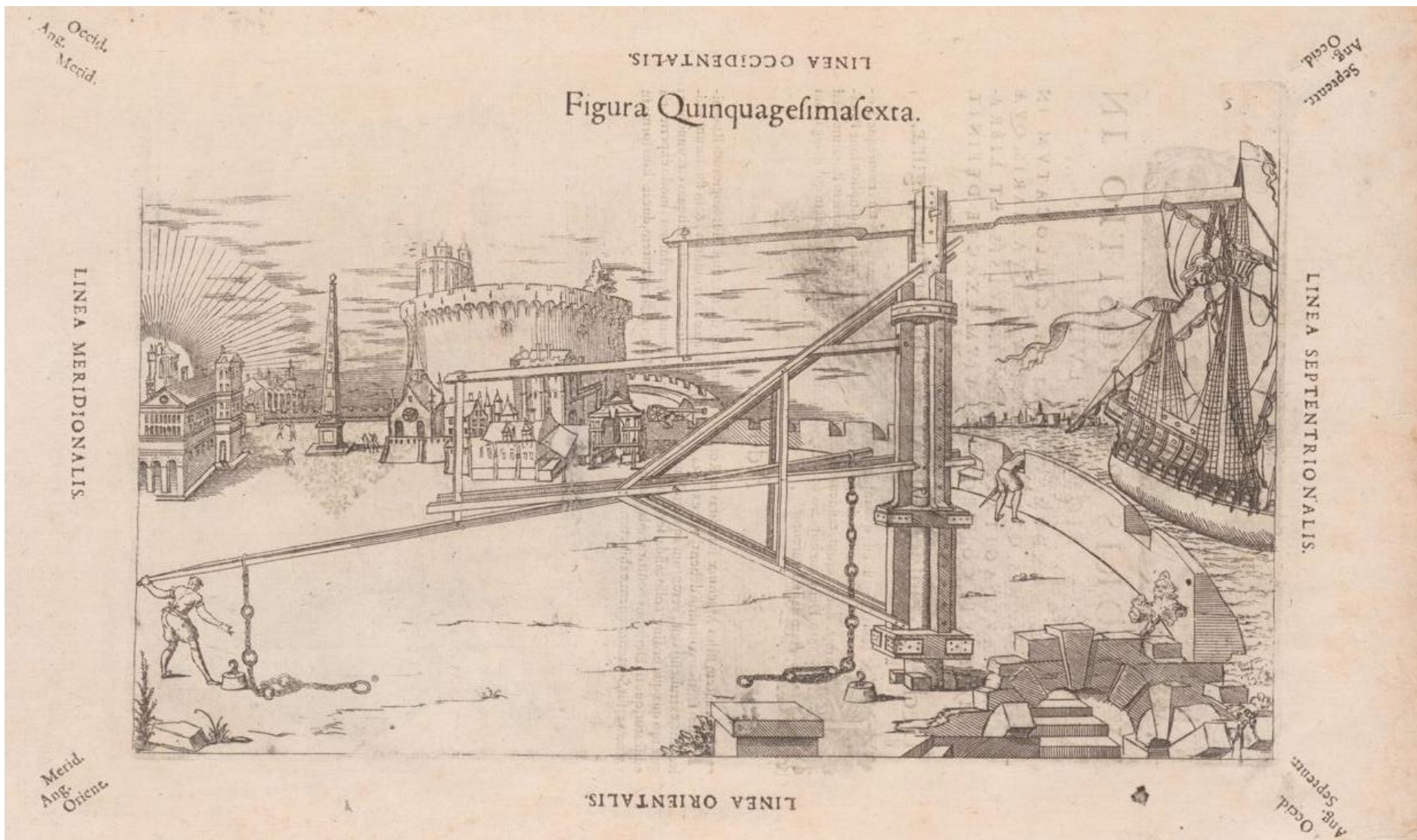
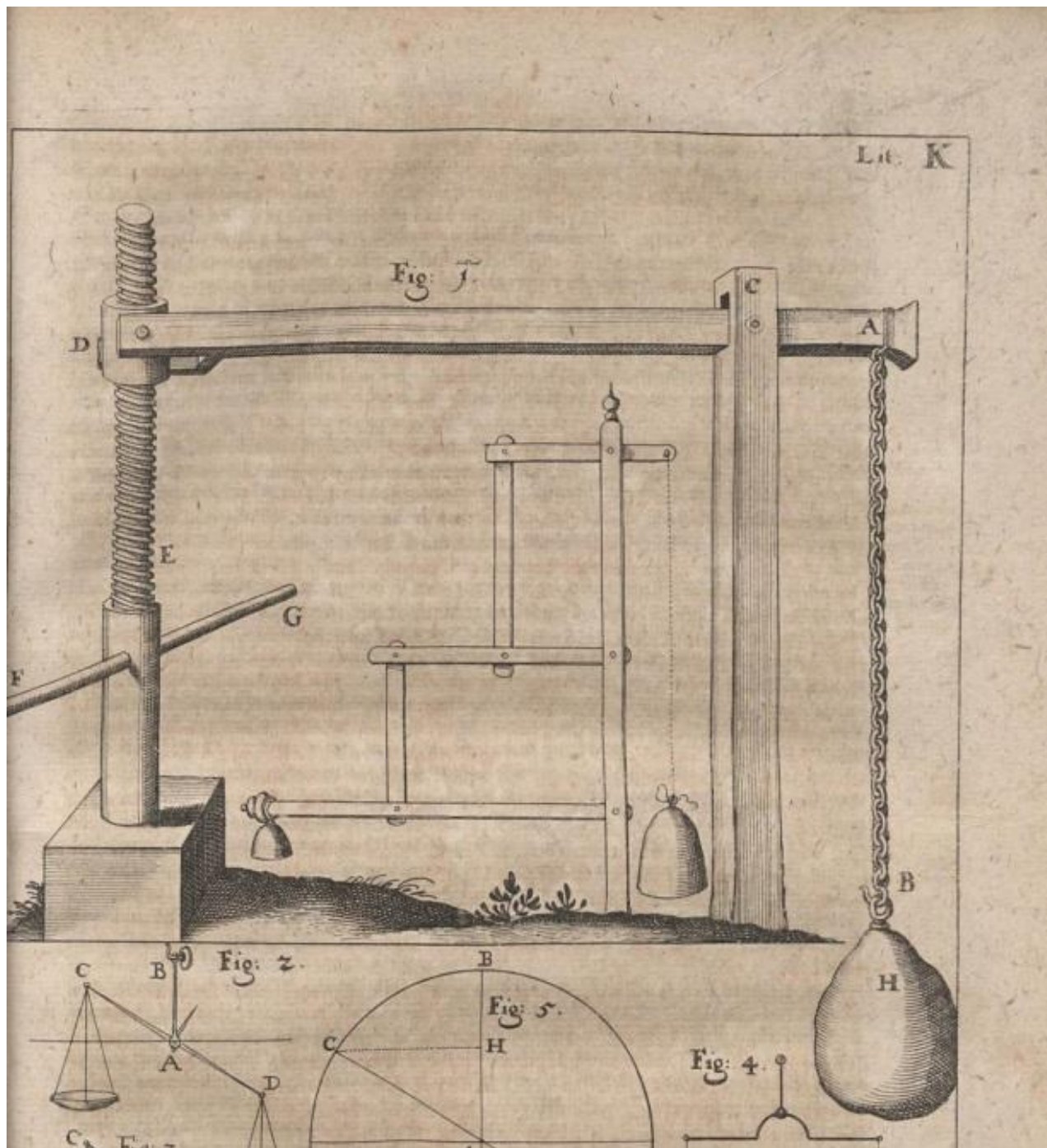


Схема рычагов степенного полиспаста

Daniel Mögling.
Mechanischer Kunst-
Kammer (1629)

Немецкий перевод
книги G. del Monte.
Mechanicorum liber
(1577) с дополнениями.



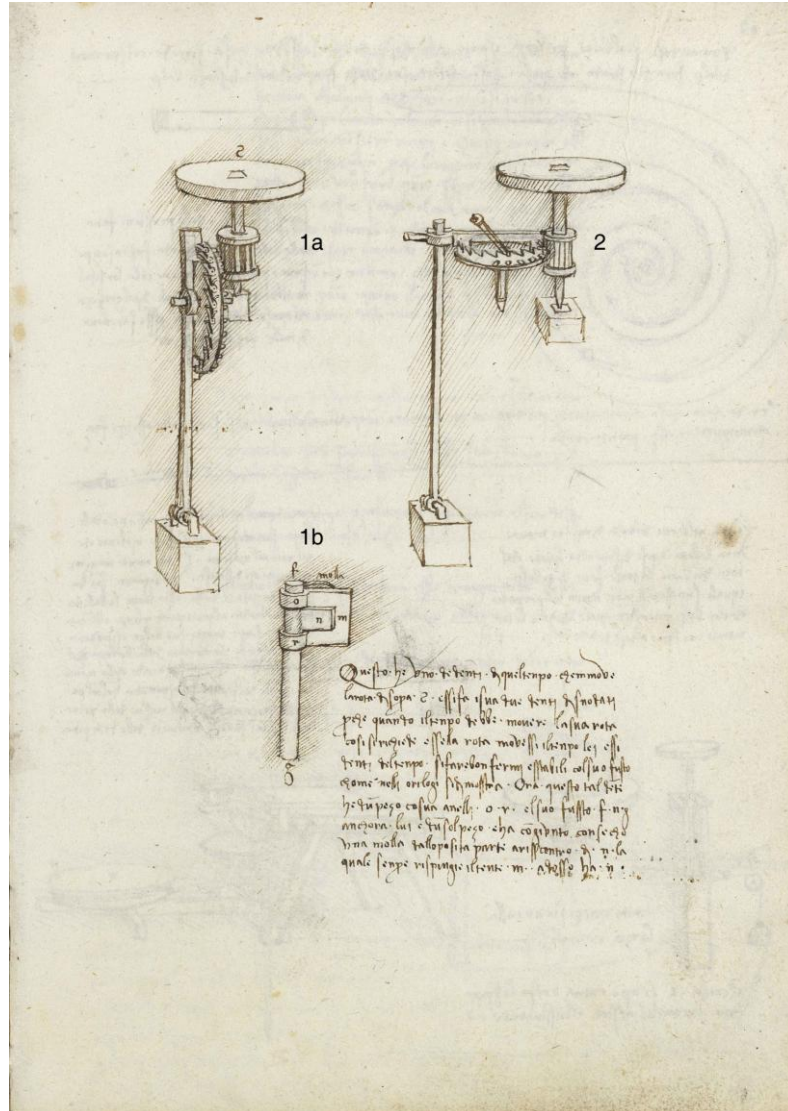
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАЯТНИКИ (XV-XVI ВВ.)

ИЗ ИСТОРИИ МАЯТНИКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАЯТНИКИ

Леонардо да Винчи.

Маятниковый механизм.

Мадридский кодекс (ок. 1500)



Jacques Besson. *Théâtre des instruments mathématiques et mécaniques* (1578).

Пилорама с маятником

