

История и методология механики  
Евгений Алексеевич Зайцев  
e\_zaitsev@mail.ru

Лекция № 27

## План лекции

1. Направление индустриальной механики в Европе, эффективное решение практических проблем точными методами (XIX в.)
2. Парижская политехническая школа.
3. Выделение кинематики из общего учения о движении.

# Традиционный разрыв между теоретической (рациональной) и практической механикой Некоторые исторические примеры

## 1. Античная и средневековая механика.

Противоречие между правилом рычага в теории и реальной практикой взвешивания.

Теория простых машин: идея сведения простых машин к рычагу. На практике ее применение приводило к значительным ошибкам.

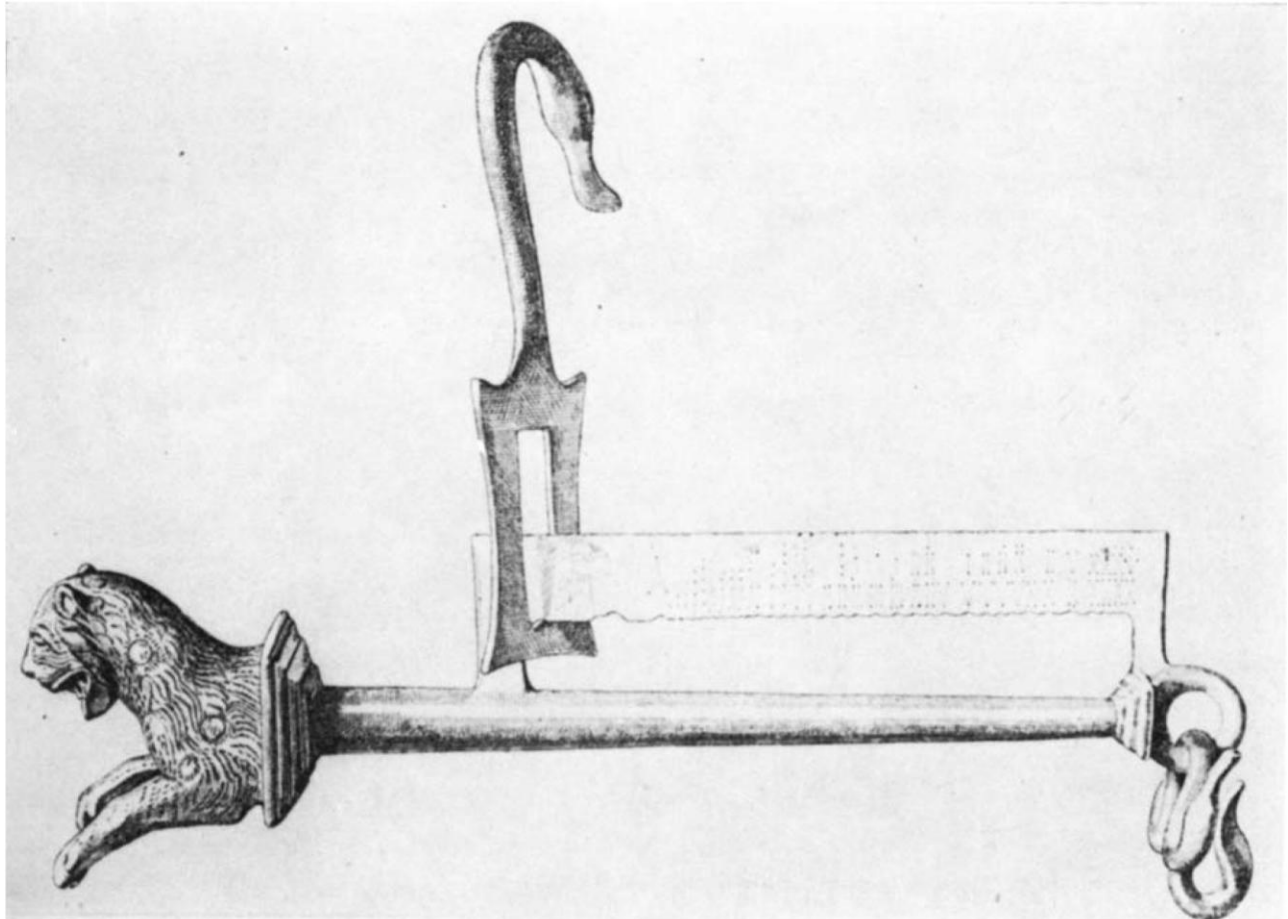
2. XVI в. Гвидобальдо дель Монте различал между «благородными» машинами (предмет теоретической механики) и машинами, используемыми в реальной практике.

3. XVII в. Вопрос о пропорциональном увеличении размеров строительных машин. Конструирование по образцам: использование моделей малых размеров. В теории исходили из указанной пропорциональности. На практике это приводило к обрушению конструкций.

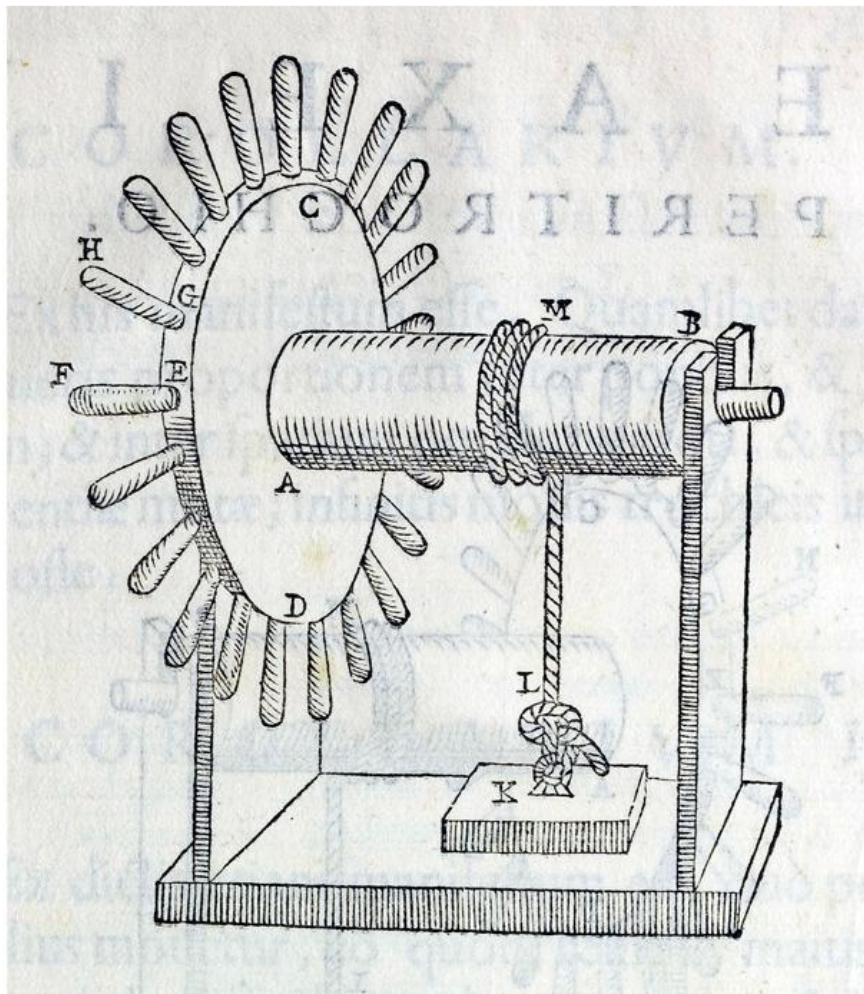
См. Галилей, «Беседы и математические доказательства...» (1638 г.) День первый – сопромат.

Разрыв между законом рычага Архимеда и реальной практикой взвешивания  
Причина: Нелинейность градуирования для весов с подвижной точкой подвеса +  
существенно весомые плечи безменов того времени.

Пример: bismar – датский безмен.



# Гвидобальдо дель Монте (1577). Проблема рычага Архимеда «Благородные» машины в теории и реальные машины в практике



В вóрте ошибка составляла ок. 30% по сравнению с расчетами по правилу рычага (из письма механиков-практиков) .

Ответ дель Монте: я не исследую работу машин, используемых на практике; предмет моего анализа служат «благородные машины», в которых отсутствует трение.

Для уменьшения трения он советует заменить деревянные элементы машин на металлические, а также использовать смазку.

К его теории простых машин это не имеет отношения.

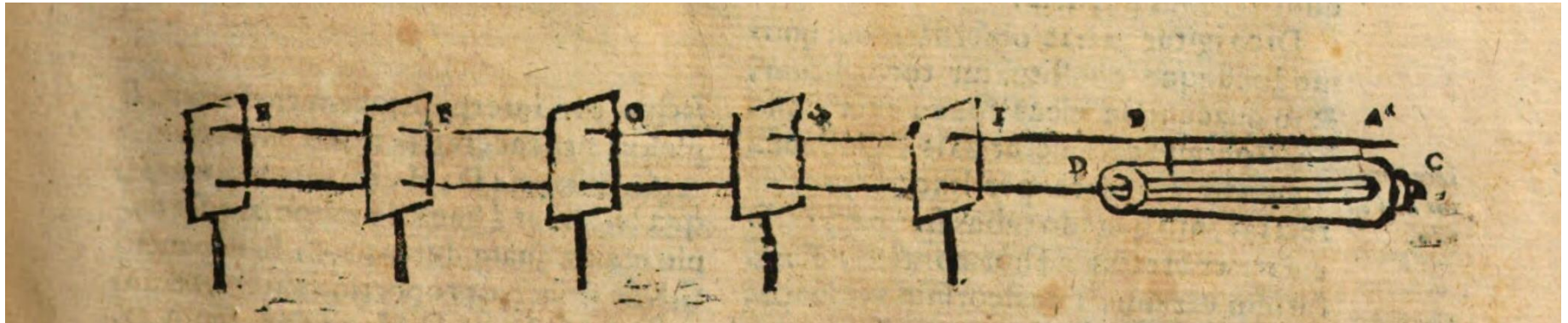


Экспериментальная проверка формы баллистической траектории.

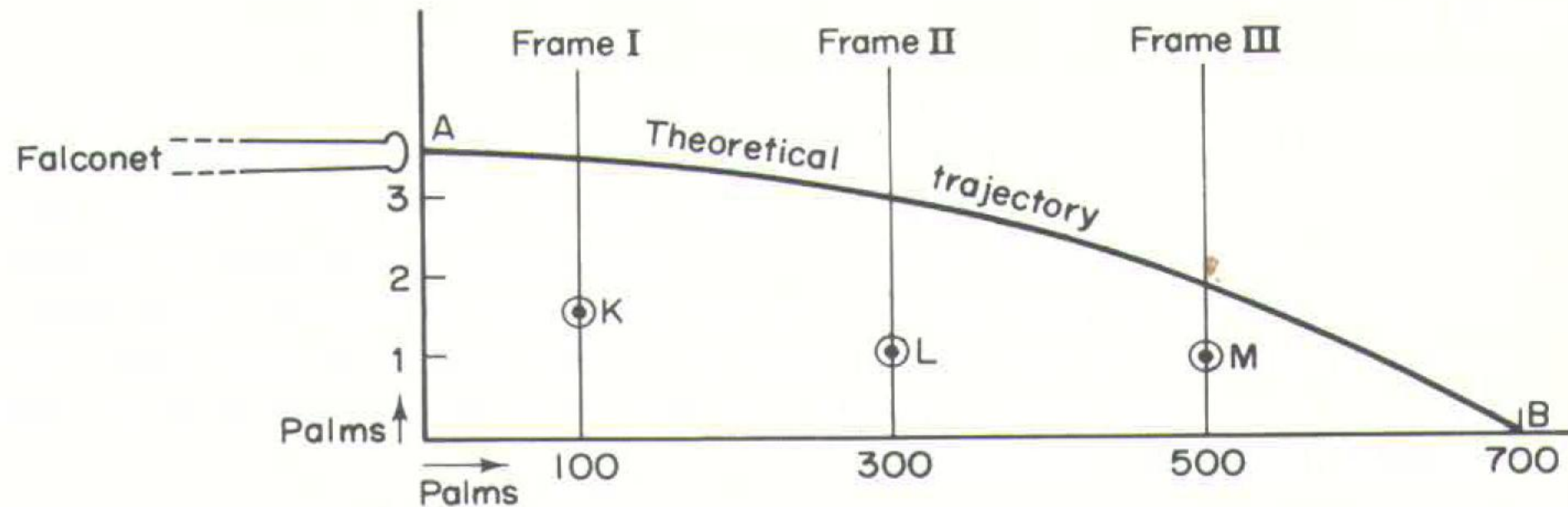
При помощи экранов для отслеживания траектории снаряда

Рис. из кн. Никколо Кабео, «Комментарий к *Метеорологике* Аристотеля» (1646).

«О пути ядра, выпущенного из бомбарды ..., и о том, какую линию оно писывает»



Из письма Дж.Б. Реньери к Торричелли от 2.08.1647: «Ваша книга о полете снарядов, свидетельствующая о Вашем весьма остром уме, достигла Генуи и дала возможность нашим гражданам провести ряд экспериментов с разного рода стрелковыми орудиями; я был удивлен тем, что столь хорошо обоснованная теория так плохо работает на практике». На рисунке в виде ветви параболы изображена теоретическая траектория. Реальная траектория снаряда, судя по отверстиям в экранах, проходит значительно ниже, через точки К, L, М.



Предпосылки рождения «индустриальной механики» в Европе (нач. XIX в.).  
Критика аналитической механики Лагранжа с позиции инженерной практики

В пределах самой теоретической механики чисто аналитическое направление Лагранжа еще при его жизни встретилось с серьезной оппозицией. Ему было противопоставлено требование наглядности, т. е. зримого, вещного представления не только результатов, но и самого хода решения механической задачи. (Ср. Гегель: важен не только результат, но и путь, который к нему привел).

Критике подверглись также исходные положения механики Лагранжа.

Во всем этом сказывалось влияние практики преподавания в высших (технических) учебных заведениях, необходимость придать теоретическому результату возможно более простую форму, чтобы добиться его использования в инженерной деятельности. Для будущих инженеров содержание научных монографий надо было изложить образным и общедоступным языком.

Первым это осознал Луи Пуансо, выступивший с критикой принципа виртуальных скоростей и предложивший более естественный для инженеров подход при помощи теории пары сил («Начала статики», 1803).

Л. Пуансо. Критика аналитической механики Лагранжа  
«Общая теория равновесия и движения систем» (1808)

Пуансо об «Аналитической механике» Лагранжа:

«Это была счастливая мысль: исходя из принципа возможных скоростей как из аксиомы и не останавливаясь на его рассмотрении, помышлять лишь о том, чтобы извлечь из него единообразный метод для получения уравнения равновесия и движения всех возможных систем.

Тем самым все трудности механики остались позади: уклоняясь, так сказать, от того, чтобы делать эту науку, ее превратили в вопрос анализа; и это преобразование, предмет и результат аналитической механики, представлялось поразительным примером мощи анализа...

Поэтому, естественно, решили, что наука уже сделана, и остается только отыскать доказательство принципа возможных скоростей».

Л. Пуансо. Критика аналитической механики Лагранжа (продолжение)  
«Общая теория равновесия и движения систем» (1808)

«Но в этих поисках встретились со всеми трудностями, через которые перешагнули, вводя принцип виртуальных скоростей, а так как в книге Лагранжа оставался ясным лишь ход вычислений, то увидели, что туман вокруг курса механики рассеялся лишь потому, что он сгустился, так сказать, в самом начале этой науки».

Перед этим Пуансо упоминает о «неясных и чуждых» понятиях – бесконечно малых движений и возмущений равновесия.

Далее Пуансо указывает, что в «Аналитической механике» Лагранжа не должно быть собственно доказательства\*) принципа виртуальных скоростей, «так как доказательство закона, охватывающего всю науку, может быть лишь сведением этой науки к другому закону, столь же общему, но очевидному или, по крайней мере, более простому, чем первый, и тем самым делающему этот первый закон ненужным».

-----  
\*) – речь идет о «доказательстве» Лагранжа при помощи системы полиспастов.

Л. Пуансо. Критика аналитической механики Лагранжа  
«Общая теория равновесия и движения систем» (1808)

И далее:

«Лагранж действительно открыл общее правило для решения или, по крайней мере, для составления уравнений всех задач механики, эта цель полностью достигнута. Но, чтобы создавать саму науку, надо выдвинуть теорию, которая охватывает в равной мере все точки зрения, с каких науку можно рассматривать.

Надо прямым путем идти не к принципу виртуальных скоростей, а к тому ясному правилу, которое сумели из него извлечь для решения задач; и прямое, естественное отыскание такого правила, единственное способное удовлетворить нам ум, составляет главный предмет этого мемуара».

Правило, о котором здесь пишет Пуансо, сводится в сущности к «принципу освобождения» от связей введением реакций связей.

## Критика «Небесной механики» Лапласа

Л. Пуансо, «Теория и определение экватора Солнечной системы» (1828)

В работе «Теория и определение экватора Солнечной системы» (1828) Пуансо показал, что Лаплас неточно определил положение своей «неизменной плоскости» (т. е. экватора) в Солнечной системе. Причина была в том, что, применяя закон площадей к этой системе, он считал планеты материальными точками и не учитывал их спутников.

Пуансо, напротив, рассматривает планеты как тела. При подсчете моментов их количества движения он учитывает те же величины и для спутников. В результате уточненный закон площадей для Солнечной системы приводит к новому положению неизменной плоскости — «экватора», которое может заметно отличаться от положения плоскости Лапласа.

Попутно Пуансо ставит вопрос о том, почему Лаплас ошибся, и его ответ на этот вопрос превращается в изложение его кредо, как механика:

## Кредо Пуансо как механика

«... Для Лапласа, как и для других прежних авторов, моменты или площади — просто численные или геометрические величины, чисто аналитические выражения, появляющиеся в уравнениях равновесия или движения и получившие название попросту для сокращения речи.

С такой геометрической точки зрения неизменная плоскость... это одна из трех координатных плоскостей, выбранных так, чтобы проекции площадей на остальные две были равны нулю...

При этом видят лишь абстрактные величины, простые формулы анализа, вовсе не думают о настоящей природе величин, рассматриваемых в науке о равновесии или о движении систем».

## Кредо Пуансо как механика (продолжение)

«А так как идея рассматривать площади в системе мира (т. е. в Солнечной системе) идет от знаменитого закона Кеплера, который относится только к секторам, описываемым радиусами-векторами планет в их эллиптическом движении вокруг Солнца, то вполне естественно, что Лаплас имел в виду лишь площади, которые получаются при движении планет по орбите, и забыл о всех остальных.

Все это, естественно, объясняет упущение или ошибку, о которой я говорю и которая могла легко остаться незамеченной в прежней теории. Но при наших принципах такие упущения невозможны».

## Кредо Пуансо как механика

«Для нас площади вовсе не поверхности, проектируемые на ту или иную плоскость, а настоящие вращательные силы или пары, действующие в системе; и дело не в том, чтобы упростить вычисление или найти плоскость, проекция на которую этих площадей максимальна, а в том, чтобы сложить действующие пары и определить величину и положение результирующей пары...».

Л. Пуансо. Критика аналитической механики  
«Новая теория вращения тел» (1834, расширенный вариант 1851)

Наибольшим успехом Пуансо в динамике была его «Новая теория вращения тел» (1834).

В ней, описав результаты, полученные в задаче о вращении тела вокруг неподвижной точки Даламбером, Эйлером и Лагранжем, Пуансо писал:

«Надо согласиться с тем, что во всех этих решениях мы видим только вычисления без какой-либо ясной картины вращения тела. Конечно, эти вычисления, более или менее длинные и сложные, позволяют определить, где окажется тело к заданному времени, но мы вовсе не видим, как оно туда попало, мы его полностью теряем из виду, тогда как хотелось бы наблюдать его и следить за ним, так сказать, взглядом в течение всего вращения.

И я старался открыть именно это отчетливое представление вращательного движения, чтобы сделать доступным обозрению то, что пока еще никем не было изображено».

Отступление о воображении (представлении).

## Судьба идей Л. Пуансо

Мемуар Пуансо «Общая теория равновесия и движения систем» (1808), направленный в «Журнал политехнической школы», рецензировался Лагранжем.

Лагранж был стар, прославлен, благодушен, и все же он дал сперва отрицательный отзыв — настолько идейно чуждой и ненужной представлялась ему работа молодого ученого. Только после продолжительной беседы со знаменитым рецензентом, в которой он отстаивал правомерность своих взглядов, Пуансо добился разрешения напечатать свой мемуар.

Действительно, такая система взглядов не только самим Лагранжем воспринималась как нечто противоположное его аналитической механике.

Однако, дальнейшее развитие, примирило — оно сблизило разные подходы: «принцип освобождения» Пуансо естественным образом приводит к уравнениям Лагранжа первого рода.

Индустриальная механика XIX века

Техническое направление и индустриальная механика

Самое лучшее изложение:

И.Б. Погребысский, «От Лагранжа к Эйнштейну» (1966)

В механике к концу XVIII в. главные успехи были достигнуты с помощью аналитических методов.

Вместе с тем, значительное место занимали работы технического направления, обозначенного Пуансо.

В первой половине XIX в. это направление развивала школа «индустриальной механики».

Впоследствии ее традиции унаследовала так называемая «техническая механика», которая к исходу века отчетливо противопоставила себя теоретической механике.

В начале XX столетия многие видные деятели науки будут прилагать усилия сблизить две механики, ликвидировать возникший раскол.

## Истоки технического направления в механике.

### Система инженерного образования

В XVIII в. в европейских странах начинает складываться система технического образования, сперва в виде военно-инженерных школ. В мирное время военные инженеры часто загружались работами гражданского назначения.

Необходимость в такой системе была вызвана усложнением техники и расширением строительства — военного и гражданского: крепостей, городов, гидротехнических сооружений, дорог.

Индивидуальное обучение на практике не могло уже обеспечить подготовку нужных кадров в нужном количестве.

Эти кадры стали подготавливать группами, под руководством преподавателей, создававших для своих учеников пособия, в которых различимы (в зародышевом состоянии) дисциплины учебного плана будущих политехнических и технологических институтов.

Техническое направление и индустриальная механика.

Практические руководства по строительному делу

Непосредственно соприкасались с курсами теоретической механики в первую очередь руководства по строительному делу.

В XVIII в. они зачастую появлялись под названием «гидравлическая архитектура» — настолько первостепенным представлялось именно гидротехническое строительство.

Многие из них — многотомные труды; они энциклопедичны и знакомят не только с правилами расчета, но и с организацией строительных работ, свойствами применяемых материалов, технической документацией.

В них велика описательная часть, потому что в гораздо большей мере строили, подражая образцам, чем по расчету.

## Бернар де Белидор (1698-1761) – военный инженер и математик

Родился в 1698 году в Каталонии.

Получил блестящее по тому времени образование. В 15 летнем возрасте уже участвовал в осаде крепостей.

Работал профессором в артиллерийской школе в Лафере, где своими блестящими лекциями и работами по математике и механике приобрел общеевропейскую известность и признание.

Разработал теорию полета бомб и создал особые таблицы стрельбы.

В 1742 участвовал в баварском походе, руководил минными работами.

В 1758 году он был назначен директором арсенала. Вскоре был произведен в бригадные генералы и занял место генерального инспектора по минной части.

Умер в 1761 в Париже.



## Б. Белидор , «Инженерная наука при фортификационных работах и в гражданском строительстве» (1710-19)

В вводной части Белидор отстаивает значение математики и механики для инженеров, выступает против мнения, «что только практика может их (инженеров) привести к цели».

Такое мнение, признается Белидор, представляет собою «препятствие, которое нелегко преодолеть». (Противопоставление инженерной практики теоретической науке и даже отрицание ценности теории для инженеров имеет немалую давность.)

Между тем теория занимает в книге Белидора скромное место. Расчеты, опирающиеся на механику, мы находим только в первых двух частях. Это — элементарная (и неудовлетворительная) теория давления земли (сыпучей массы) на опорную стенку и некоторые формулы для расчета сводов.

Механика здесь — в объеме элементарной статики, главным образом определение центров тяжести некоторых простых тел. Требуемые математические средства — не дальше квадратных уравнений, причем решение этих уравнений тут же излагается — Белидор знал своих возможных читателей.

Но даже такой скромный теоретический аппарат не без сопротивления входил в инженерный обиход.

## Техническое направление и индустриальная механика

Однако число инженеров высшей квалификации, каким был Белидор, росло, как росло и число теоретиков, связанных с инженерами по работе в технических учебных заведениях.

Ценя и развивая теорию, эти люди стремились заставить ее говорить на языке практики. Французская революция 1789 г., уничтожение старой системы образования и организация Политехнической школы — все это сразу расширило круг лиц — участников этого процесса сближения теории с практикой.

В Политехнической школе резко повысили теоретическую подготовку будущих инженеров, а представителей академической науки самого высокого ранга привлекли к этой подготовке.

По этому пути несколько позже пошли и в России, Пруссии и других странах.

Каждое новое поколение инженеров давало ученых, связанных с техническими запросами.

Так постепенно сформировалось направление «индустриальной механики».

## Техническое направление и индустриальная механика

Но в этот период были нужны не только квалифицированные инженеры. Индустриализация европейских стран потребовала большого числа техников и квалифицированных рабочих, т. е. людей со средним или начальным техническим образованием. В значительной мере подготовка кадров велась в рамках частной инициативы, особенно в Англии. Сюда относятся и различные формы обучения для повышения квалификации рабочих и ремесленников. Успехи английской промышленности заставили страны континента обратить внимание на эту сторону дела.

Выдающийся французский математик и инженер-кораблестроитель Шарль Дюпен (Charles Dupin, 1784—1873), тесно связанный с промышленными кругами, внимательно изучив английский опыт, стал одним из инициаторов в деле организации обучения мастеров и рабочих во Франции.

Его руководство «Геометрия и механика прикладных искусств, ремесла и искусства» (1825—1826) предназначалась для мастеров, рабочих и управляющих мастерскими и мануфактурами.

В 1830 г. – перевод на русский язык.

## Шарль Дюпен

«Геометрия и механика прикладных искусств, ремесла и искусства» (1825—1826)

Начиналась эта трехтомная книга обращением «К французским рабочим». В нем Дюпен писал: «Я отправился в страну наших соперников в промышленности; я увидел, что влиятельные и ученые люди совместными усилиями организовали обучение для английских, шотландских, ирландских рабочих, благодаря чему те становятся более умелыми, более уверенными в себе и более сведущими. Тех же благ и еще больших я желаю для вас. Я считаю, что вам можно дать образование более полное и с большими преимуществами, и я пытался это сделать».

Курс лекций, на основе которого написана книга Дюпена, автор читал в парижской «Консерватории (т. е. хранилище) прикладных искусств и ремесел» в 1824—1825 гг., и этот курс привлек около 600 слушателей.

Аналогичные курсы были организованы во многих городах Франции, в частности в Меце, где читал Понселе. Велась эта работа под лозунгом содействия классу промышленных рабочих «в часы, когда прекращается работа в мастерских». Все это было целенаправленным мероприятием для решения «проблемы кадров» на первых этапах капиталистической индустриализации с привлечением довольно большого числа ученых и инженеров.

Жерар Жозеф Кристиан, «Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

«Трактат по промышленной механике» Ж.Ж. Кристиана (J.-J.M. Christian, 1776—1832) начал выходить на несколько лет раньше книги Дюпена. В нем выставлено программное положение, что есть две механики:

(i) механика индустриальная, предмет которой изучение и отыскание средств, дополняющих физическую силу и ловкость человека и снижающих затраты времени при выполнении необходимых работ, и

(ii) механика рациональная, которая состоит в логически развиваемых выводах из одного общего положения. В этой рациональной (теоретической) механике сила, равно как и ее воздействие, — величины абстрактные, которым приписываются какие угодно качества и значения.

Напротив, в индустриальной механике движущая сила — это реальность, это нечто вроде первичного вещества, которое можно приходить, нужно экономить, которое всегда покупают и за которое часто платят немалую цену.

Кристиан заходит настолько далеко, что отвергает даже возможность рассматривать индустриальную механику как применение принципов и результатов теоретической механики...

## Части машины (по К.Марксу) и индустриальный капитализм

К. Маркс, «Капитал» (т. 1, с. 384).

«Всякое развитое машинное устройство состоит из трёх существенно различных частей:

- (i) машины-двигателя,
- (ii) передаточного механизма, наконец
- (iii) машины-орудия, или рабочей машины.

Машина-двигатель действует как движущая сила всего механизма. Она или сама порождает свою двигательную силу, как паровая машина, калорическая машина, электромагнитная машина и т. д., или же получает импульс извне, от какой-либо готовой силы природы, как водяное колесо от падающей воды, крыло ветряка от ветра и т. д.

Передаточный механизм, состоящий из маховых колёс, подвижных валов, шестерён, эксцентриков, стержней, передаточных лент, ремней, промежуточных приспособлений и принадлежностей самого различного рода, регулирует движение, изменяет, если это необходимо, его форму, например превращает из перпендикулярного в круговое, распределяет его и переносит на рабочие машины».

## Части машины (по К.Марксу) и индустриальный капитализм

### Машина-орудие

«Обе эти части механизма существуют только затем, чтобы сообщить движение машине-орудию, благодаря чему она захватывает предмет труда и целесообразно изменяет его. Промышленная революция в XVIII веке исходит как раз от этой части — от машины-орудия. Она же и теперь образует всякий раз исходный пункт при превращении ремесленного или мануфактурного производства в машинное производство.

Если мы присмотримся ближе к машине-орудию, или собственно рабочей машине, то мы в общем и целом увидим в ней, хотя часто и в очень изменённой форме, всё те же аппараты и орудия, которыми работают ремесленник и мануфактурный рабочий; но это уже орудия не человека, а орудия механизма, или механические орудия. ...

Итак, рабочая машина — это такой механизм, который, получив соответственное движение, совершает своими орудиями те самые операции, которые раньше совершал рабочий подобными же орудиями».

## Части машины (по К.Марксу) и индустриальный капитализм

«Количество рабочих инструментов, которыми человек может действовать одновременно, ограничено количеством его естественных производственных инструментов, количеством органов его тела. В Германии как-то сделали попытку заставить прядильщика двигать два прядильных колеса, т.е. работать одновременно обеими руками и обеими ногами. Но это требовало слишком большого напряжения. Позже изобрели ножную прялку с двумя веретёнами, но такие прядильщики-виртуозы, которые могли бы одновременно прядь две нитки, встречались почти так же редко, как двуголовые люди.

Напротив, дженни (механическая прялка – *Е.З.*) уже с самого своего появления прядёт 12–18 веретёнами, чулочновязальная машина разом вяжет многими тысячами спиц и т. д. Таким образом, количество орудий, которыми одновременно действует одна и та же рабочая машина, с самого начала освобождается от тех органических ограничений, которым подвержено ручное орудие рабочего».

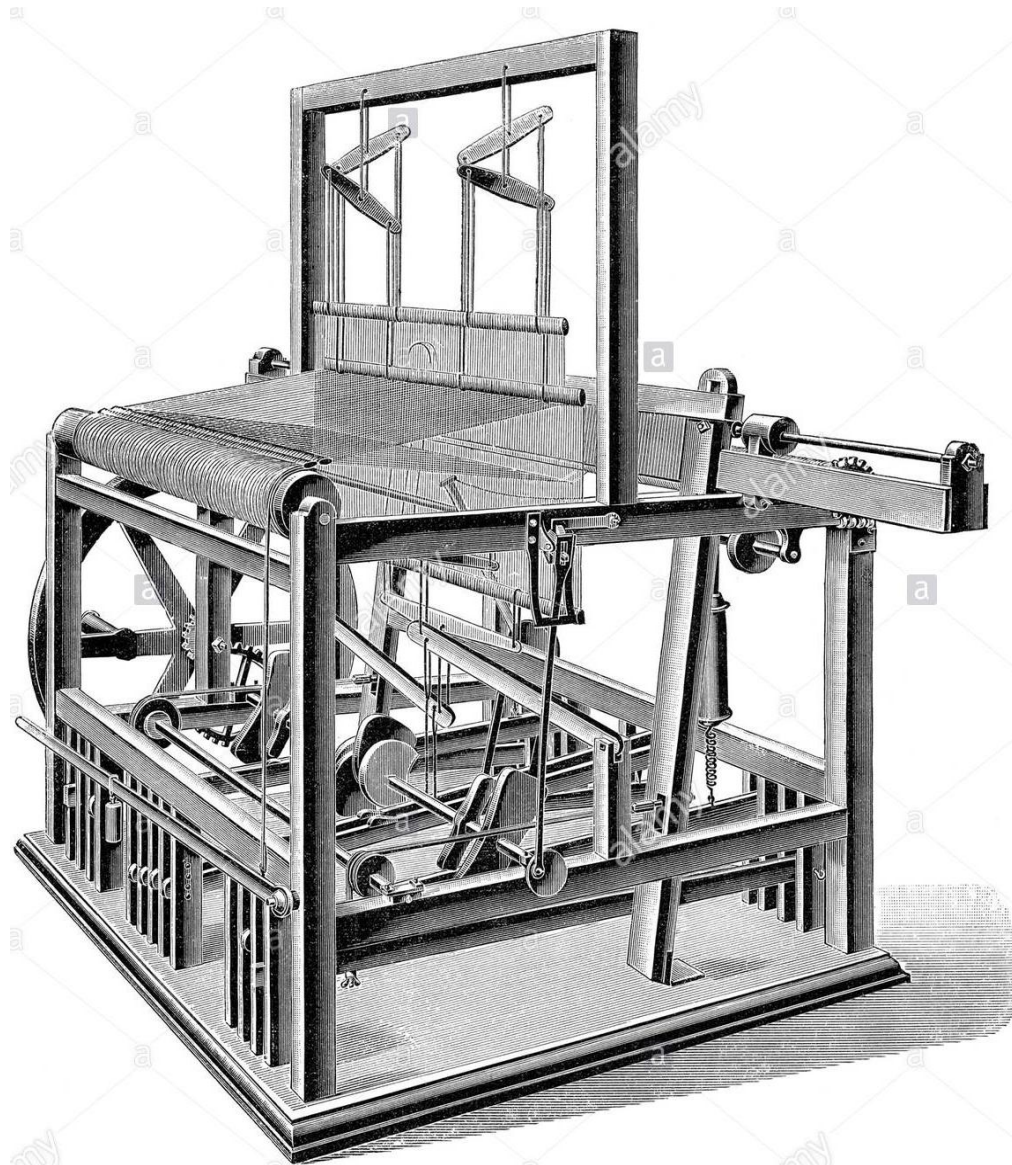
## Суть промышленной революции – замена руки человека механическим орудием

«Но в мельнице совершенно так же, как и в прессе, механическом молоте, плуге и т. п., собственно работа, т. е. удары, расплющивание, размалывание, раздробление и т. д., производится с самого начала без человеческого труда, даже если двигательной силой является человек или животное. Оттого-то этот род машин, по крайней мере в своем первоначальном виде, очень древнего происхождения, и в них раньше, чем в других, применялась собственно механическая двигательная сила. Оттого-то они и являются почти единственными машинами, которые мы встречаем в период мануфактуры.

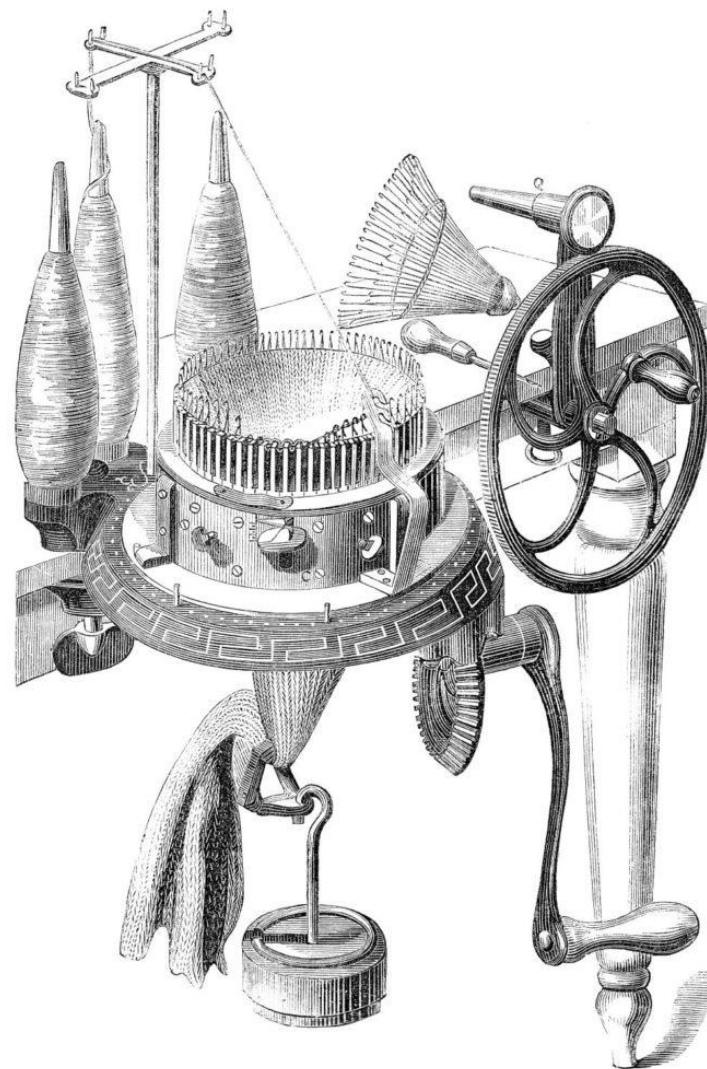
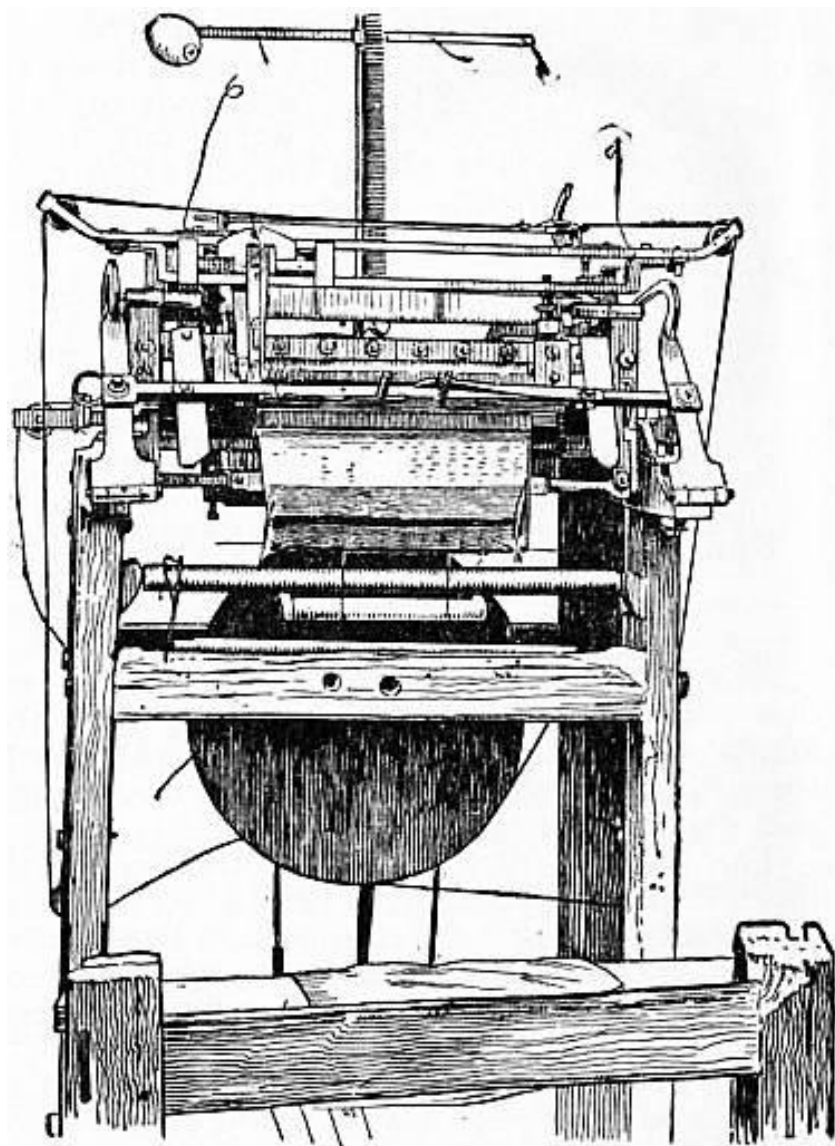
Промышленная революция начинается тогда, когда механизм применяется там, где издавна для получения конечного результата требовалась работа человека, следовательно, не там, где, как в вышеописанных орудиях, к собственно обрабатываемому материалу рука человека с самого начала никогда не прикасалась. Иначе говоря, промышленная революция начинается с применения механизма там, где человек, по самой природе вещей не действует с самого начала лишь как простая сила».

К. Маркс, «Капитал», с. 264

# Ткацкий станок с маховым колесом ( кон. XVIII в.)

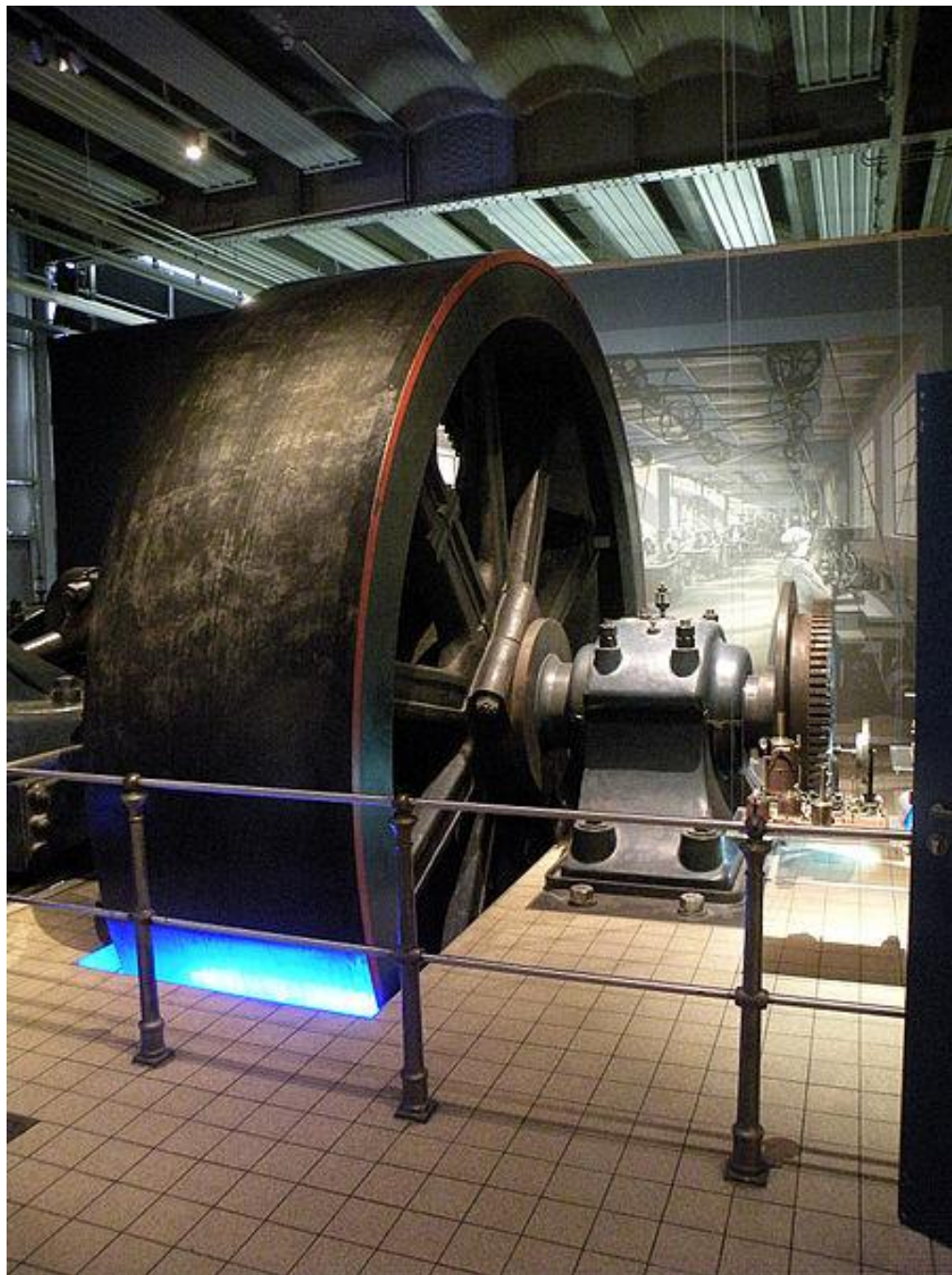


## Ткацкие станки с маховыми колесами (кон. XVIII-XIX вв.)



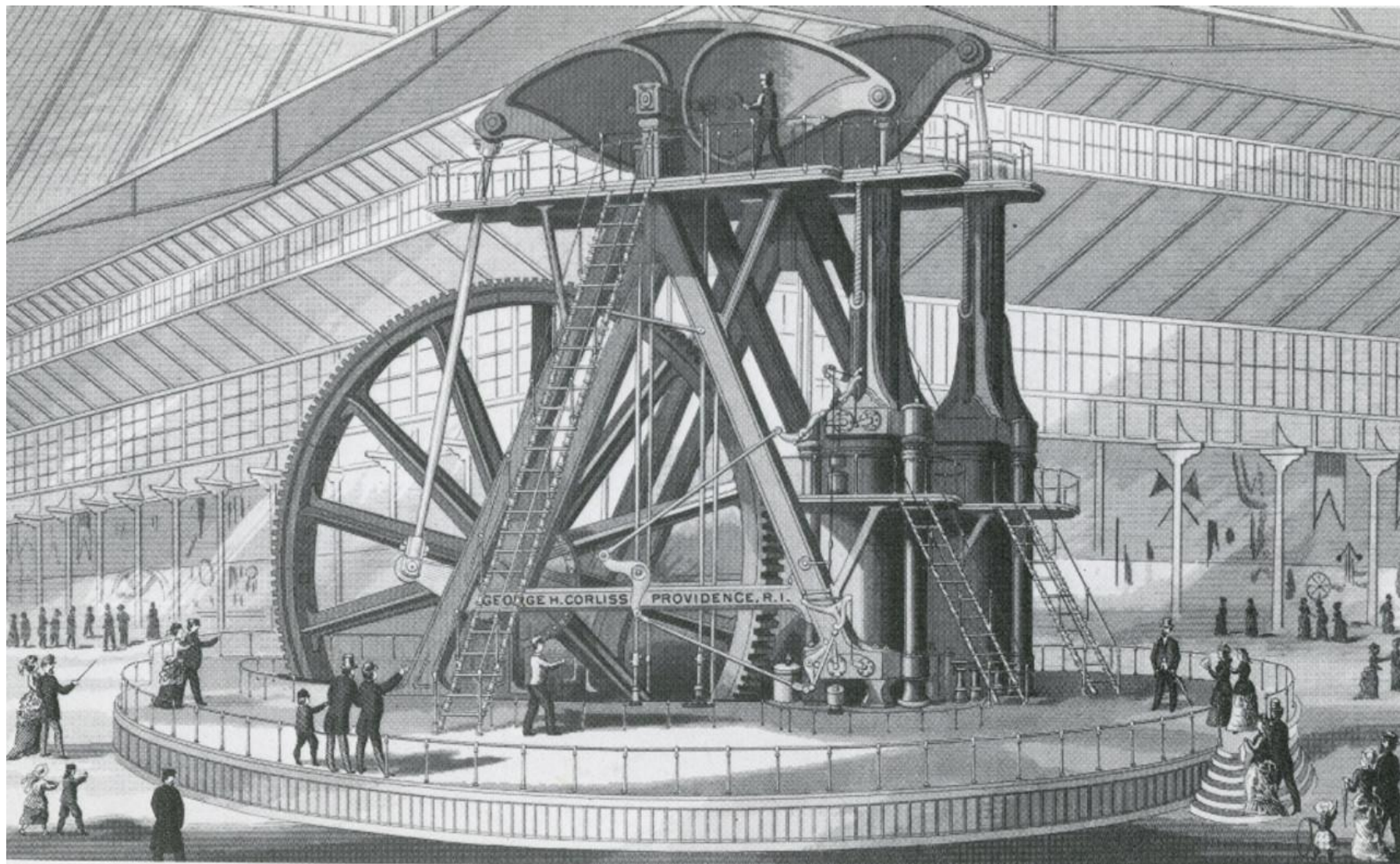
**Маховик паровой машины (XIX в.) – визитная карточка промышленной революции .**



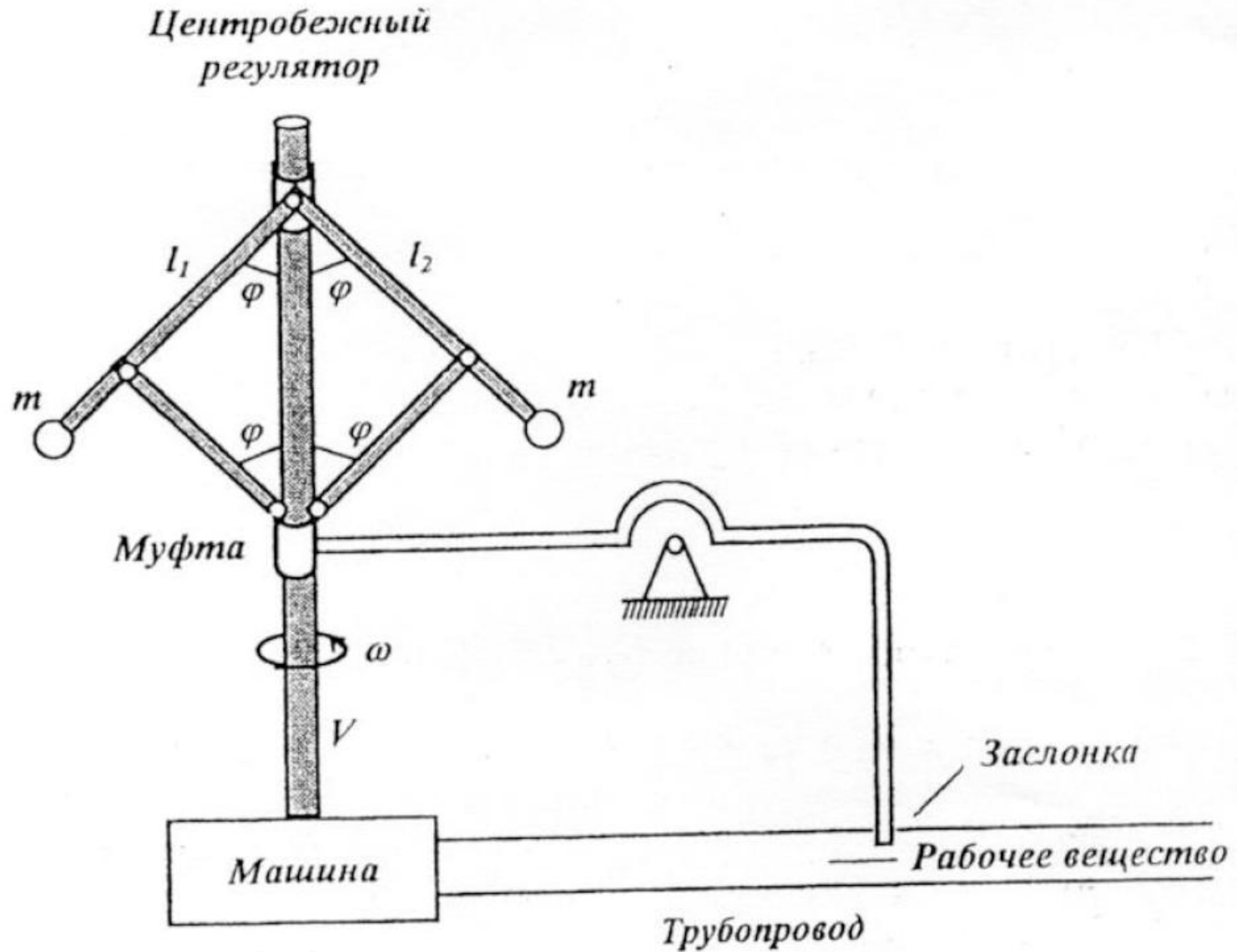


Маховик фабричной  
паровой машины (XIX в.)

Corliss Centennial Engine (1876). Маховое колесо (диаметр 9.1 м)



# Проблема регуляторов. Центробежный регулятор (Уатта)



## Регулятор Уатта (Максвелл, Стодола, Вышнеградский)

Характерный пример: аналитическая механика «спускается с небес на землю»

Необходимость использования регуляторов скорости вращения рабочего вала.

Проблема устойчивости регуляторов.

Частные нарушения в работе регуляторов, фиксировавшиеся в середине XIX в. объясняются тем, что в связи с возрастанием мощности машин стали применять более тяжелые заслонки и для их управления потребовались более значительные массы шаров.

Совершенствование обработки поверхностей приводило к уменьшению коэффициента трения.

Увеличение рабочей скорости машин сделало необходимым уменьшение моментов инерции вала и связанных с ним деталей.

Все это приводило к неустойчивости вращения.

# Проблема регуляторов. Регулятор Уатта (Максвелл, Стодола, Вышнеградский) Аналитическая механика «спускается с небес на землю»

Тезис И.А. Вышнеградского:

«Трение есть существенная принадлежность чувствительного и правильно работающего регулятора».

Или, коротко: «без трения нет регулятора».

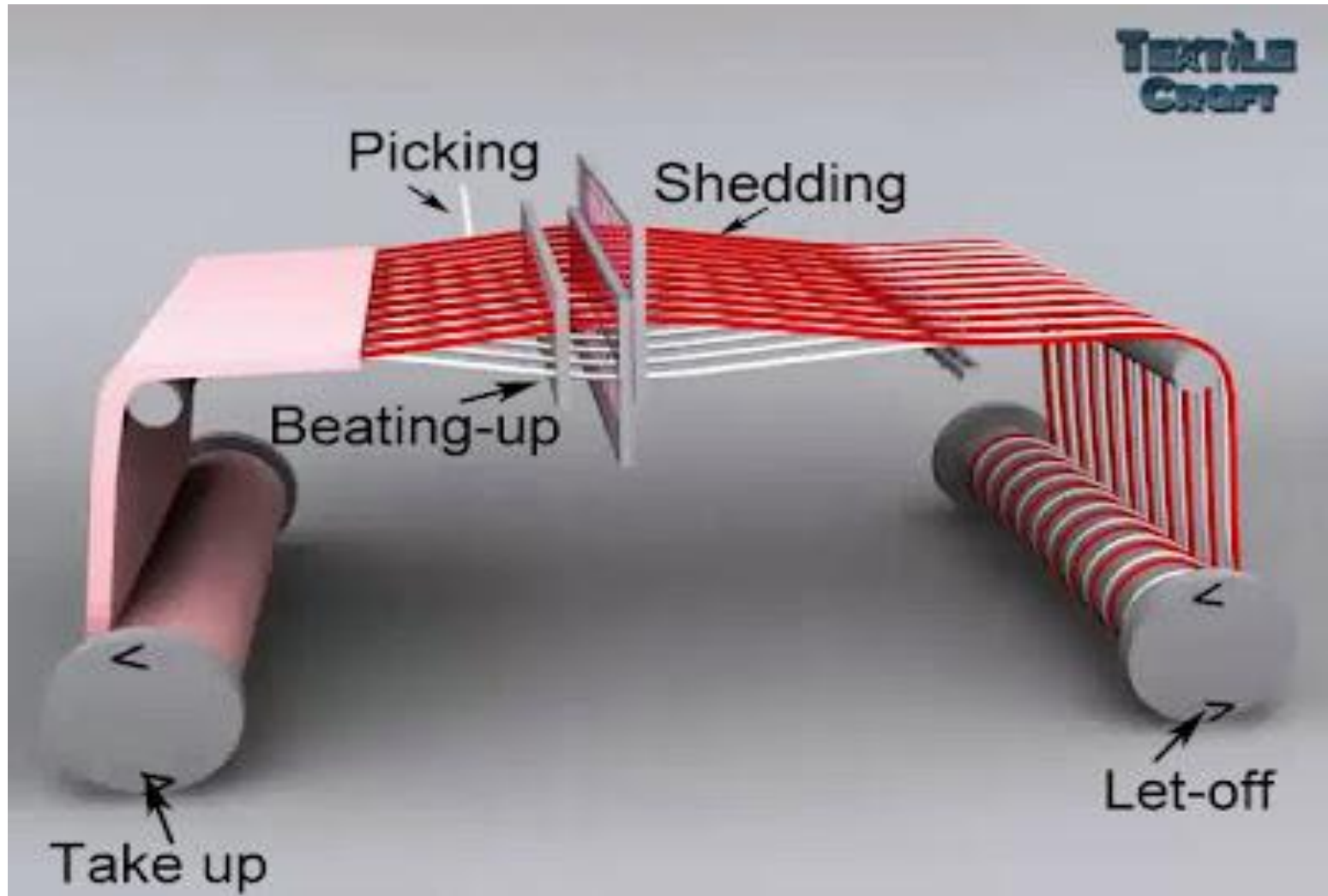
Вывод, сделанный Вышнеградским в 1876 г. на основе нестрогих рассуждений о линеаризации, произвел большое впечатление на современников.

Его нетривиальность заключалась в том, что из инженерной интуиции и практики совершенно не следовало, что коэффициент трения является определяющим в обеспечении устойчивой работы регулятора.

В тех случаях, когда трение недостаточно, возникает эффект, который можно сравнить с нереализуемостью верхнего положения равновесия маятника. Желаемый режим работы регулятора становится нереализуемым из-за своей неустойчивости.

## Weaving Motion

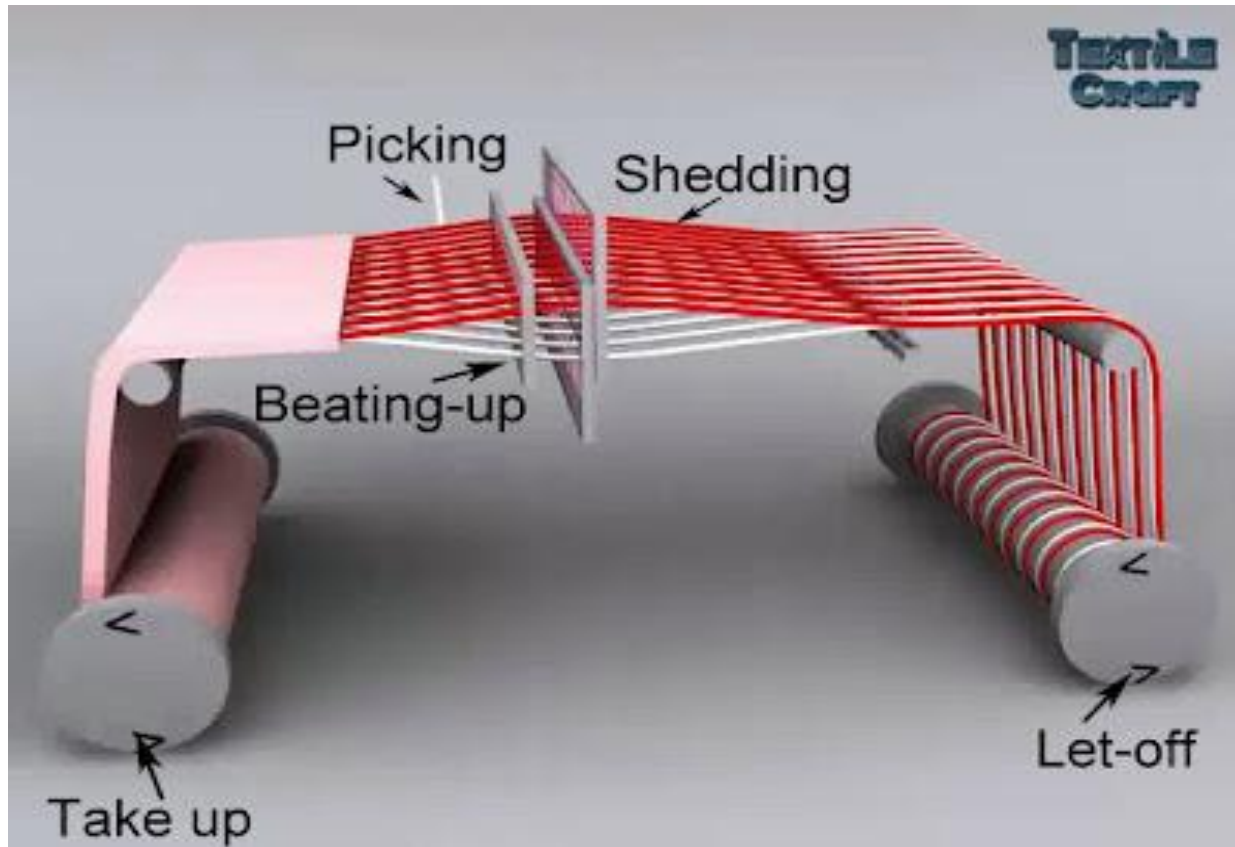
Shedding (ремизы), Picking (челнок, нитепрокладчик), Beating-up (батан).  
Let-off motion (навой), Take Up motion (торсионный вал).



Weaving is the most basic process in which two different sets of yarns or threads are interlaced with each other to form a fabric or cloth. One of these sets is called warp (основа) which is the lengthwise yarn running from the back to the front of the loom. The other set of crosswise yarns are the filling, which are called the weft or the woof. Therefore Weaving loom motions can be broadly categorized as follows:

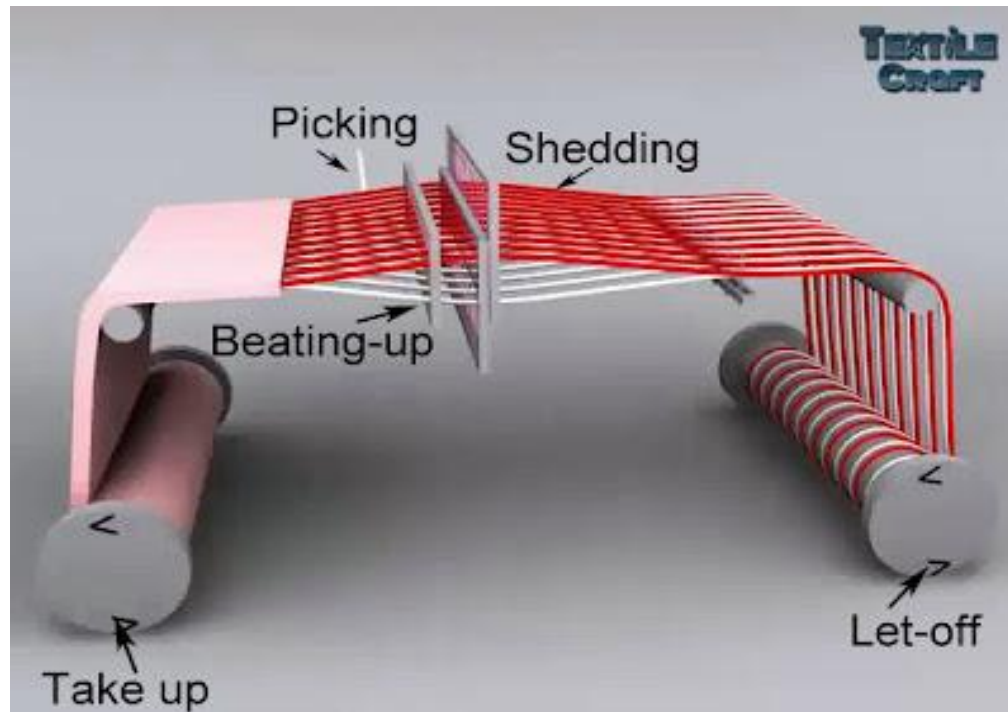
**Primary Motions:** Shedding, Picking, Beating-up.

**Secondary Motions:** Let-off motion, Take Up motion.



**Shedding:** The separation of warp thread by lifting and lowering of heald frames, according to pattern, to allow for weft insertion. **Picking:** The process of inserting the filling yarn through the shed while the shed is opening. **Beating-up:** The process of pushing the filling yarn into the already woven fabric at a point known as the fell and done by the reed.

**Let-off motion:** This is the motion which delivers warp to the weaving area at the required rate and at a suitable constant tension by unwinding it from a flanged tube known as the weaver's beam. **Take Up motion:** This is the motion that withdraws fabric from the weaving area at a constant rate. It ensures that the required pick spacing is maintained, and then winds it onto the cloth roller.



Жерар Жозеф Кристиан, «Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

Индустриальная механика только соприкасается с теоретической, но не «порождается» ею, ибо ее единственными основами являются опыт и наблюдение, и только исходя из данных опыта и наблюдения, индустриальная механика указывает инженерному искусству (от которого она независима) принципы и правила, которыми оно должно руководствоваться.

Уточняется же задача индустриальной механики на основе классификации средств и операций, применяемых для выполнения механических работ.

## Жерар Жозеф Кристиан, «Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

Во-первых, прежде всего мы встречаемся с двигателями и различными способами приведения их в действие независимо от их назначения;

во-вторых, с разными способами передачи и видоизменения действия этих двигателей с помощью сочетания деталей, составляющих машину в точном значении этого слова;

в-третьих, с разными способами выполнения какой-либо механической операции, каковы бы ни были используемые двигатели и промежуточные механизмы, передающие или преобразующие движение;

в-четвертых, мы обнаруживаем (или, по крайней мере, можем быть уверены, что существуют) общие зависимости между двигателями и механизмами, т. е. собственно машинами, между машинами и выполняемыми ими производственными операциями.

В соответствии с этими четырьмя предметами трехтомный трактат Кристиана разделен на четыре части.

Ср. с частями машины по Марксу

Жерар Жозеф Кристиан,  
«Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

При выполнении своей программы Кристиан не может, конечно, обойтись без отвергаемой им теоретической механики, но он действительно сводит к минимуму заимствуемые оттуда понятия и сведения.

У него нет уравнений движения, математический аппарат — в пределах элементарного курса, систематически приводятся ссылки на результаты опытов и таблицы замеренных в опыте необходимых расчетных величин — от величины производимой за день работы человеком, лошадью до данных об упругости водяного пара при различных температурах.

Ж. Ж. Кристиан, «Трактат по промышленной механике» (1822-1825).  
Понятие силы, мощности, работы

Чтобы проиллюстрировать идейную направленность трактата, проследим, как Кристиан вводит понятие силы (первая глава первой части трактата).

Сначала автор указывает, что можно описать и оценить эффект «движущей силы», но определить ее нельзя.

Анализируя действие источника силы — двигателя, мы убеждаемся, что оно определяется действующей массой и скоростью, с которой действие производится.

В связи с этим становится необходимым определение мощности двигателя, а для этого определения надо знать количество произведенной работы.

Затем дается определение работы как произведения силы на путь, проходимый в направлении ее действия перемещаемым телом (через работу силы тяжести, собственно, против силы тяжести), и вводится понятие мощности.

Все это излагается не только на языке механики, но и на языке экономики: работа то, что оплачивают.

Жерар Жозеф Кристиан,  
«Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

Трактат Кристиана был предназначен для промышленников и мастеров (artistes). Он показывает наличие тяги к теории в этой среде.

По использованному в нем материалу, по характеру физических и технических сведений он значительно выше книги Белидора, но это — за счет работы целого столетия, а в понимании значения и характера взаимодействия теории и практики вообще, теоретической механики и инженерных наук, в частности, его автор стоит ниже своего предшественника.

У Кристиана выделены в отдельные части вопросы динамики машин и вопросы кинематики механизмов, но его односторонний эмпиризм не мог быть основой для будущего развития.

Жерар Жозеф Кристиан,  
«Трактат по промышленной механике» (1822-1825)

Если книга Дюпена была откликом на назревшую потребность поставить на более широкую и научную основу дело обучения и повышения квалификации низшего и среднего технического персонала, то книга Кристиана должна была дать людям такой квалификации возможность творчески участвовать в разработке научных основ производственных процессов механического характера.

Резюме

Отвергать в связи с этим «сошедший с небес на землю» мощный аналитический аппарат теоретической механики значило увековечить, а не преодолеть разрыв между запросами промышленности и теоретической наукой.

Разрыв был неизбежен: теоретическая механика в XVIII в. могла взять и взяла разгон в области астрономических задач (расчет орбит планет и комет), но ее достижения в области земных задач были куда скромнее.

## Техническое направление и индустриальная механика

По отношению к общим схемам и закономерностям механики те, кто мог и должен был решать прикладные задачи, могли занять две противоположные позиции:

либо объявить область прикладных задач чем-то вполне автономным и совершенно заново начать выработать там свои схемы и искать обобщения,

либо идти к этим схемам и обобщениям от того и с помощью того, чем уже располагала наука и что оказалось вполне эффективным в небесной механике, где и не надо было принимать в расчет сухое трение, вязкость, «упругие несовершенства» и т. п.

## Техническое направление и индустриальная механика

Первый путь сравнительно легко приводил к результатам ограниченного значения, но бесспорной полезности — в виде каких-то таблиц, эмпирических формул, на худой конец — словесных рекомендаций.

К нему тяготели техники-практики, его поощряли промышленные круги: здесь «отдача» была видна, вложенные средства давали ощутимый результат.

Второй путь был гораздо труднее, результаты — отдаленнее: нужно было глубже проникать в физику явлений, уточнять эксперимент, совершенствовать и усложнять математический аппарат; серьезных успехов, как это сейчас видно, можно было добиваться в сложном и тонком взаимодействии теории и эксперимента; требования к чистоте эксперимента тут были гораздо выше; нельзя было абсолютизировать применяемую модель, нужна была гибкость мышления.

Все это давалось с трудом, частями, трудно было и с психологической стороны.

## Техническое направление и индустриальная механика

Борьба этих двух подходов прослеживается в течение всего XIX столетия и дальше, до наших дней.

Во второй четверти XIX столетия появляется школа «индустриальной механики», но уже не в смысле Кристиана, а так сказать, в рамках теоретической механики.

Само выражение «индустриальная механика» было введено, видимо, основоположником этого направления – Ж. В. Понселе (1788—1867).

## Жан-Виктор Понселе (1788-1867)

1834 Понселе избран в Парижскую академию наук.

1841 избран вице-президентом академии, а в 1842—президентом.

1848 г. бригадный генерал Понселе назначен командующим Политехнической школой.

Он много занимался современной техникой: по заданию Академии наук он написал свыше 60 отзывов на различные изобретения.

В 1857 после Международной выставки в Лондоне и пользуясь ее материалами Понселе издал двухтомный «Отчет о машинах и инструментах, применяемых на производстве», содержащий интересный материал о технике середины XIX в.



## Жан-Виктор Понселе (1788-1867)

Биография Понселе механика примечательна, она является хорошим примером влияния «социального заказа» на деятельность ученого.

Понселе окончил Политехническую школу в 1812 г. Через год он — офицер инженерных войск «Великой армии» Наполеона — оказался в плену в Саратове. Решив «на досуге» заняться наукой, но не имея нужной литературы, Понселе стал по памяти составлять записки по математическим дисциплинам. Он убедился, что элементарная часть курсов алгебры, дифференциального и интегрального исчисления оставила заметный след в его памяти, и это помогло ему восстановить наиболее существенные результаты из раздела о вычислении площадей и объемов, но сведения из механики о сложении скоростей или количества движения выветрились бесследно.

Так, Понселе занялся чисто математическими исследованиями, которые он продолжал, вернувшись на родину, и систематически изложил в «Трактате о проективных свойствах фигур», составившем эпоху в истории геометрии (издан в 1822 г.).

## Жан-Виктор Понселе и индустриальная механика

В те годы Понселе был преподавателем математики в военной школе в Меце и по-прежнему не помышлял о механике, пока не прочел в адресованном ему письме военного министра следующее:

«Так как комиссия по просмотру курсов и устава артиллерийско-инженерной школы признала полезным ввести в этой школе практический курс механики, я сообщаю Вам, что по предложению этой комиссии и благодаря поступившему ко мне похвальному отзыву о Ваших способностях и Ваших выдающихся познаниях в геометрии я поручаю Вам этот специальный курс» .

Сам Понселе об этом вспоминал так: «Если не с отвращением, то, во всяком случае, с живым чувством сожаления я, наконец, согласился в 1825 г. взять на себя этот тяжкий труд, к которому я никак не был подготовлен и который, лишив меня всякого досуга, отодвигал на неопределенный срок опубликований геометрических работ...».

Понселе тщательно готовился к своему курсу, предварительно посетив фабрики и заводы во Франции, Бельгии и Германии (поездке в Англию помешала болезнь).

## Ж.-В. Понселе. «Курс механики в приложении к машинам»

Первой работой Понселе по общей теории машин был «Курс механики в приложении к машинам» (1826).

Курс разделен на три неравные части: третья часть по своему объему равна двум первым.

В первой части Понселе занимается общими законами движения машин; объект изучения он определяет так:

«Машины, рассматриваемые с промышленной точки зрения, имеют своей задачей выполнение определенных производственных работ при помощи двигателей или же движущих сил, доставляемых природой; таковыми являются животные, ветер, вода, тепло».

Ж.-В. Понселе. «Курс механики в приложении к машинам» (1826)

## Уравнение живых сил (сохранение энергии)

Основной содержание первой части составляет вывод уравнения живых сил в применении к машинам в общем и в некоторых частных случаях:

*Изменение живой силы системы за конечный промежуток времени равно сумме работ всех сил (внутренних и внешних), приложенных к системе, за тот же промежуток времени.*

Характерным для Понселе является стремление к точности и ясности в выражениях. Вводя новые обозначения, он тщательно поясняет их, и указывает на терминологию, применяемую другими авторами, пытается установить единообразие в терминах.

Во 2-ой части «Об основных способах регулирования действия сил в машинах и обеспечения равномерности движения» Понселе рассматривает передачу (трансмиссии) и преобразование движений в машинах.

В 3-ей части излагает учение о полезных и вредных сопротивлениях и моментах инерции тел.

## Ж.-В. Понселе. «Индустриальная механика» (1839)

«Индустриальная механика» (1839) значительно отличается от литографированных лекций как по объему, так и по содержанию. Она состоит из трех частей: первая посвящена вводным замечаниям, вторая — общим вопросам статики и динамики, а третья — теории машин и двигателей.

Основные обозначения и понятия изложены в первой части (в частности, § 44—45 посвящены выяснению понятия работы).

Вторая часть содержит краткий курс теоретической механики, изложенный на основе техники и с техническими примерами очень элементарно и с большим педагогическим мастерством. Каждое новое понятие Понселе рассматривает с разных точек зрения, приводит примеры и добивается того, что чтение курса оказывается доступно и лицам с элементарной математической подготовкой.

В этом сказалась реакция деятелей французского технического образования против математизации механики Лагранжем: геометры Пуансо и Понселе обращают больше внимания на создание образов, чем на математические их модели.

## Ж.-В. Понселе. «Индустриальная механика» (1839)

Особенно большое внимание во второй части уделяется теории вращения твердого тела вокруг оси, центробежной силе и вредным сопротивлениям в машинах.

Силу инерции Понселе определяет как противодействие ускоряемого тела, приложенное к ускоряющему.

Понятие механической работы является основным содержанием книги: оно рассматривается в первой и во второй частях; от понятия работы Понселе переходит к исследованию живой силы и уравнению живых сил для машины. Это же понятие и его значение для исследования машин развивается и в третьей части книги: здесь автор (в первой главе) резюмирует принципы, на основании которых строит учение о машинах. Из этих принципов 1-й определяет понятие силы, 2—5-й — работу силы на некотором пути, 6-й — величину и направление силы инерции, 7-9-й — живую силу для поступательного, вращательного и общего случаев движения тела, 10—14-й — живую силу тела для конечного и бесконечно малого промежутка времени и системы тел.

Отдельный параграф третьей части посвящен теории и установке маховиков; параграф содержит вычисление живой силы маховика и его веса.

## Ж.В. Понселе. «Индустриальная механика» (1839)

Как это и следует из принципов Понселе, основной задачей машины является преобразование работы. Основное внимание – на трансмиссию.

Здесь могут быть два предельных случая:

- (1) передача незначительных сил
- (2) передача больших мощностей.

В первом случае механизм передачи не имеет большого значения.

Во втором подчиняется жестким условиям и составляет предмет учения о передаче (трансмиссии).

Что касается двух других составляющих машины — приемника или двигателя и орудия, то они нуждаются в дополнительном исследовании; об орудии вообще трудно что-либо сказать ввиду крайнего разнообразия орудий.

## Ж.В. Понселе. «Индустриальная механика» (1839)

Понселе не разделяет исследование машины на кинематическое и динамическое, тем более что с кинематикой и те годы не все еще было выяснено.

Не было выяснено, например, такое важнейшее понятие кинематики, как понятие ускорения; сделал это сам Понселе в 1841 г.

Школе индустриальной механики мы обязаны введением термина «работа» в его современном значении.

До этого та же величина встречалась под различными наименованиями («количество действия», «механическая мощность», «динамический эффект» и т.п.

В связи с четким выделением этой величины Кориолис предложил называть живой силой не  $mv^2$ , а  $1/2mv^2$ , что и укоренилось, так как именно эта величина сопоставляется с работой в уравнении живых сил.

## Становление кинематики

## Становление кинематики

Одной из составных частей направления индустриальной механики были исследования в той области, которую теперь называют кинематикой механизмов.

Несмотря на ограниченность энергетических ресурсов до эры паровой машины и каменного угля, а отчасти, пожалуй, благодаря этой ограниченности, и тогда создавались и входили в применение самые разнообразные механические приспособления.

В XV и XVI столетиях начинают появляться книги о машинах и механизмах определенного назначения, например трактат Агриколы (около 1550 г.) по горному делу. В XVII в. подобных книг становится значительно больше.

## Становление кинематики

В более поздний период наибольшей известностью пользовался «Theatrum machinarum» («Театр машин») Лейпольда (Leupold, 1724). В нем наряду с обычной систематизацией материала по областям применения использована группировка и по характеру осуществляемого изменения движения.

Например, выделяются «машины», преобразующие круговое движение в прямолинейное, — это уже чисто кинематическая характеристика механизмов. Кинематический анализ, очевидно, становился все более отчетливо выделяемым этапом в практике механика-конструктора. Важность такого анализа была осознана к концу XVIII в., по меньшей мере, двумя людьми — Эйлером и Монжем.

Можно включить в этот список И. Канта, указавшего в «Метафизических началах естествознания» (1786) на то, что в учении о движении можно выделить такую часть, в которой оно изучается независимо от понятий силы и массы.

Мысль о том, что начинать надо с изучения движения, как такового, высказывал в своей «Динамике» (1743) Даламбер, который вообще стремился избегать использования понятия силы..

## Становление кинематики

Л. Карно обратил внимание на принципиальную и методическую целесообразность выделения из механики учения о геометрических движениях, как он выражался, относя это учение, как и Эйлер, к геометрии.

В «Геометрии положения» он пишет, что «геометрия могла бы включить в себя движения, не связываемые с взаимодействием тел; ибо механика, собственно говоря, не наука о движении, а наука о сообщении движения... Не движение само по себе является предметом механики, а эффект видоизменений, которым оно подвергается».

И далее еще более определенное высказывание:

«Механика и гидравлика (т.е. гидромеханика) в огромной мере упростились бы, если бы была развита теория геометрических движений. Они свелись бы к развитию общего принципа передачи движений, который является ничем иным, как принципом равенства действия и противодействия. Большие аналитические трудности, с которыми мы встречаемся в учении о равновесии и движении, происходят главным образом из-за отсутствия теории геометрических движений и эта теория заслуживает того, чтобы ученые ей уделили все свое внимание».

В дальнейшем эти идеи развил А.-М. Ампер.

## Андре-Мари Ампер (1775-1836)

Родился в Лионе в 1775 г. Получил домашнее образование.

В 1799 становится репетитором в Политехнической школе (Париж).

В 1805 там же получает место на кафедре математики.

В этот период Ампер публикует ряд математических исследований, посвящённых математическому анализу и теоретической физике, что принесло ему авторитет в научном мире.

В 1814 избран членом Академии наук.

С 1824 профессор экспериментальной физики в Коллеж де Франс

Умер от пневмонии в 1836 г.

Основные работы в области электродинамики.



## Становление кинематики. А.-М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

Соображения Ампера о необходимости выделения новой механической дисциплины, легли в основу рабочего плана целой группы механиков и заметно повлияли на многие курсы механики ближайших десятилетий.

Поэтому имеет смысл привести его рассуждения на этот счет.

Они начинаются следующим заявлением:

«Я давно... заметил, что обычно в начале всех книг по этим наукам опускают те соображения, которые, при достаточном их развитии, могли бы составить целую науку. ... Эта наука должна включать все то, что можно сказать о различных видах движения независимо от могущих их произвести сил.

## Становление кинематики. А.М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

«Сначала она должна заниматься всеми рассмотрениями, относящимися к путям, проходимым в различных движениях, ко времени, которое при этом затрачивается, к определению скоростей по различным зависимостям между пройденным путем и временем.

Затем она должна изучать различные приспособления, с помощью которых одно движение можно превратить в другое. И называя, как обычно, эти приспособления машинами, следует определить машину не так, как принято, — приспособление, с помощью которого можно изменить направление и величину данной силы, — а как приспособление, с помощью которого можно изменить направление и скорость движения».

## Становление кинематики. А.-М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

«Таким образом, мы делаем это определение не зависящим от рассмотрения действующих на машину сил, что может только отвлечь внимание того, кто хочет понять ее устройство.

Например, чтобы составить себе ясное представление о том зубчатом зацеплении, с помощью которого минутная стрелка часов делает двенадцать оборотов, тогда как часовая делает только один, надо ли заниматься силой, приводящей часы в движение?

Разве действие зацепления, поскольку оно регулирует отношения скоростей этих двух стрелок, не остается тем же, когда движение вызывается какою-либо силой, отличною от силы обычного двигателя, например, когда мы поворачиваем минутную стрелку пальцем?»

## Становление кинематики.

А.-М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

Трактат, в котором все движения рассматривались бы независимо от сил, могущих их вызвать, был бы исключительно полезен для обучения. В нем было бы изложено то трудное, что может представиться при рассмотрении действия различных машин, но учащемуся не приходилось бы одновременно бороться с трудностями, которые могут возникнуть при рассмотрении равновесия сил.

Именно такую науку, которая рассматривает сами по себе движения, наблюдаемые нами в окружающих телах и, особенно, в устройствах, называемых машинами, я называю кинематикой от греч. слова *kinema* — движение».

## Становление кинематики.

А.-М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

### О принципе виртуальных скоростей

Затем Ампер уточняет, какие задачи должна решать кинематика.

«После этих общих рассуждений о том, что такое движение и скорость, кинематика должна особенно заниматься соотношениями между скоростями различных точек машин и вообще любой системы материальных точек при любом движении машины или системы; короче, определением того, что называют виртуальными скоростями, независимо от сил, приложенных к материальным точкам,— определением, которое неизмеримо легче понять тогда, когда мы полностью отвлекаемся от сил.

Когда... надо будет изложить тем, кто хорошо усвоил это определение, общую теорему, известную под названием принципа виртуальных скоростей, эта теорема, которую так трудно разъяснить при обычном порядке изложения, уже вовсе не будет трудна».

## Становление кинематики.

А.М. Ампер «Опыт по философии наук» (1834)

Статика, по Амперу, должна следовать за кинематикой, потому что понятие о движении возникает в связи с непосредственными наблюдениями, тогда как мы не видим сил, вызывающих движение, и об их существовании мы судим только по наблюдаемым движениям.

«Кроме того, удобно, чтобы соотношения между виртуальными скоростями были уже вычислены в кинематике, дабы статика могла их использовать при определении условий равновесия различных систем сил».