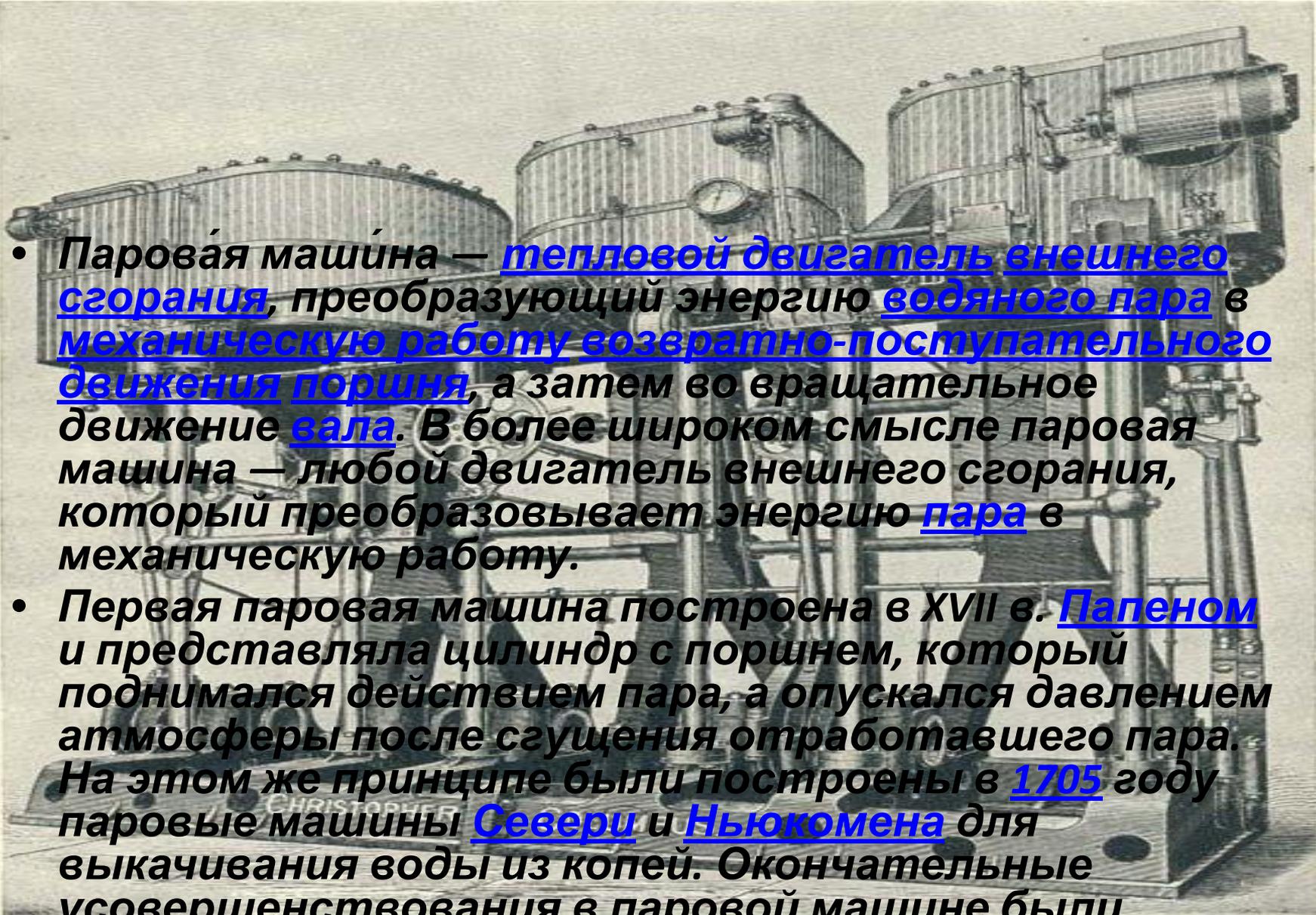
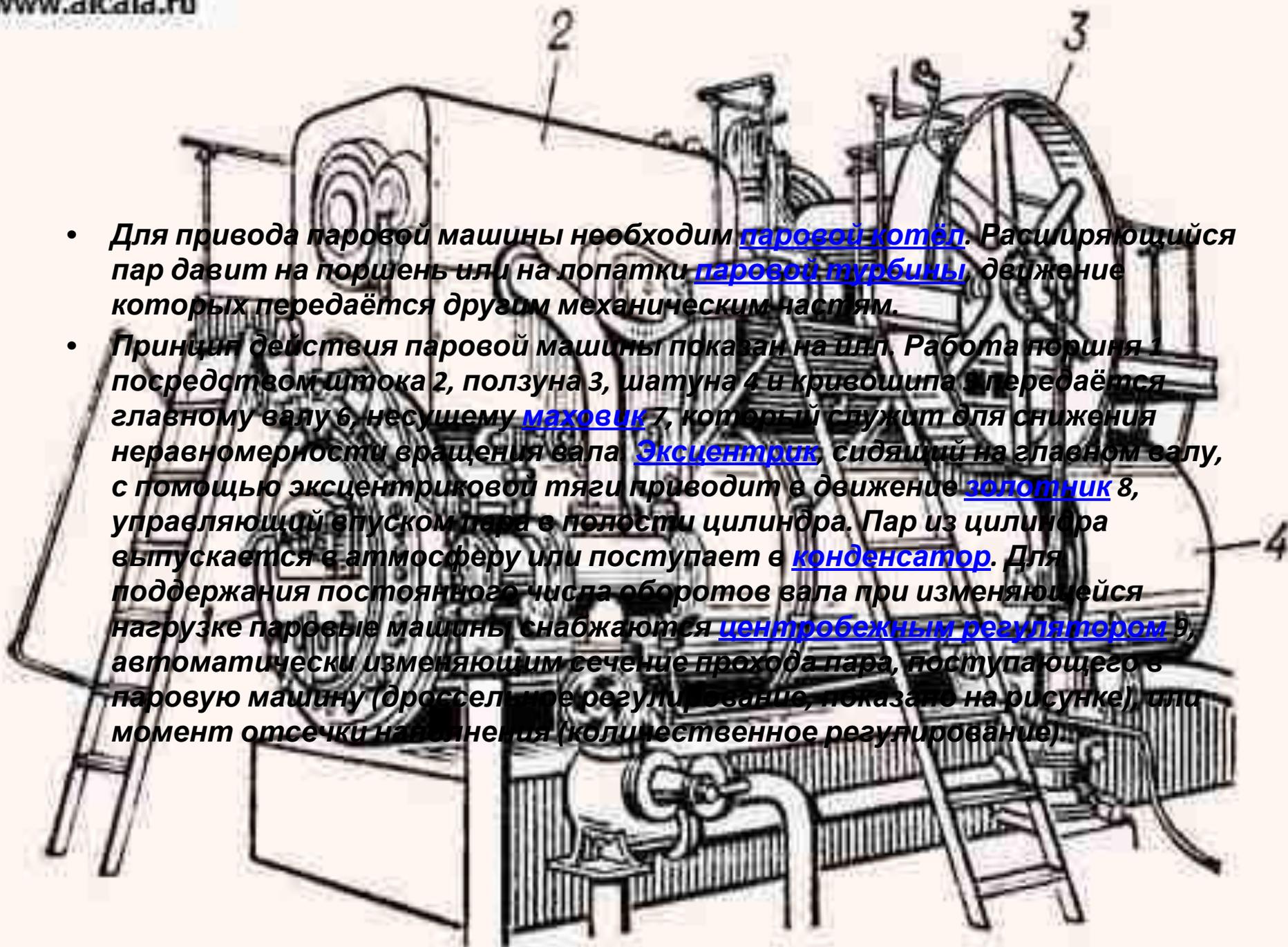


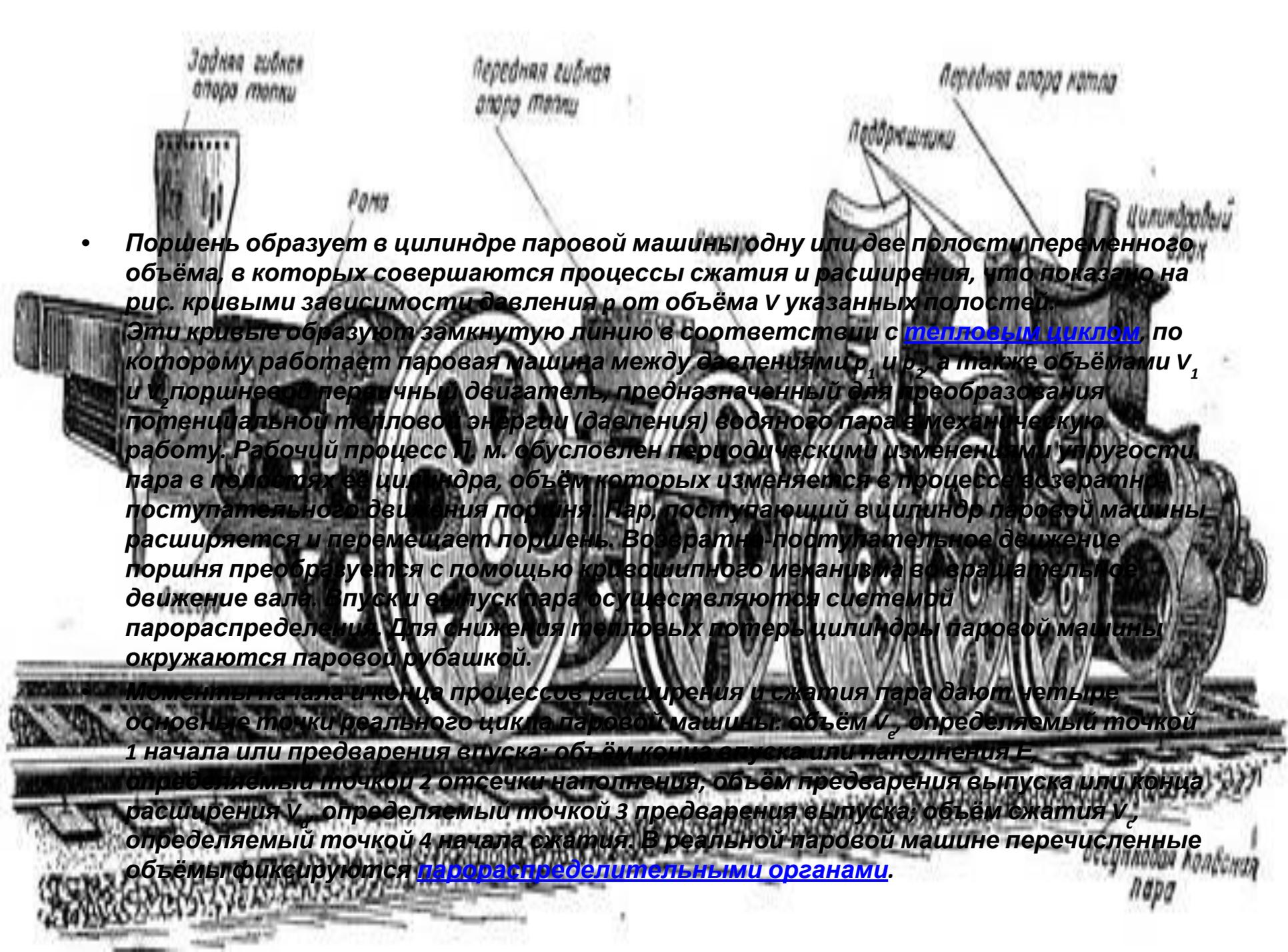
Паровые Машины

- 
- Паровая машина — тепловой двигатель внешнего сгорания, преобразующий энергию водяного пара в механическую работу возвратно-поступательного движения поршня, а затем во вращательное движение вала. В более широком смысле паровая машина — любой двигатель внешнего сгорания, который преобразовывает энергию пара в механическую работу.
  - Первая паровая машина построена в XVII в. Папеном и представляла цилиндр с поршнем, который поднимался действием пара, а опускался давлением атмосферы после сгущения отработавшего пара. На этом же принципе были построены в 1705 году паровые машины Севери и Ньюкомена для выкачивания воды из копей. Окончательные усовершенствования в паровой машине были сделаны Джеймсом Уаттом в 1769 году.

(DEVELOP MORE HORSE POWER THAN ANY OTHER TRIPLE EXPANSION ENGINES ON THE LAKES.)  
Sizes of Cylinders: 26, 42 and 70 by 42 inches stroke.



- Для привода паровой машины необходим [паровой котёл](#). Расширяющийся пар давит на поршень или на лопатки [паровой турбины](#), движение которых передаётся другим механическим частям.
- Принцип действия паровой машины показан на илл. Работа поршня 1 посредством штока 2, ползуна 3, шатуна 4 и кривошипа 5 передаётся главному валу 6, несущему [маховик](#) 7, который служит для снижения неравномерности вращения вала. [Эксцентрик](#), сидящий на главном валу, с помощью эксцентриковой тяги приводит в движение [золотник](#) 8, управляющий впуском пара в полости цилиндра. Пар из цилиндра выпускается в атмосферу или поступает в [конденсатор](#). Для поддержания постоянного числа оборотов вала при изменяющейся нагрузке паровые машины снабжаются [центробежным регулятором](#) 9, автоматически изменяющим сечение прохода пара, поступающего в паровую машину (дроссельное регулирование, показано на рисунке), или момент отсечки на входе (количественное регулирование).



- Поршень образует в цилиндре паровой машины одну или две полости переменного объёма, в которых совершаются процессы сжатия и расширения, что показано на рис. кривыми зависимости давления  $p$  от объёма  $V$  указанных полостей. Эти кривые образуют замкнутую линию в соответствии с [тепловым циклом](#), по которому работает паровая машина между давлениями  $p_1$  и  $p_2$ , а также объёмами  $V_1$  и  $V_2$  поршневого перемещенного двигателя, предназначенный для преобразования потенциальной тепловой энергии (давления) водяного пара в механическую работу. Рабочий процесс  $p, V$  обусловлен периодическими изменениями упругости пара в полостях его цилиндра, объём которых изменяется в процессе возвратного поступательного движения поршня. Пар, поступающий в цилиндр паровой машины расширяется и перемещает поршень. Возвратно-поступательное движение поршня преобразуется с помощью кривошипного механизма во вращательное движение вала. Впуск и выпуск пара осуществляются системой парораспределения. Для снижения тепловых потерь цилиндры паровой машины окружаются паровой рубашкой.
- Моменты начала и конца процессов расширения и сжатия пара дают четыре основные точки реального цикла паровой машины: объём  $V_1$ , определяемый точкой 1 начала или предварения впуска; объём конца впуска или наполнения  $V_2$ , определяемый точкой 2 отсечки наполнения; объём предварения выпуска или конца расширения  $V_3$ , определяемый точкой 3 предварения выпуска; объём сжатия  $V_4$ , определяемый точкой 4 начала сжатия. В реальной паровой машине перечисленные объёмы фиксируются [парораспределительными органами](#).

# Преимущества и недостатки

- Основным преимуществом паровых машин, как двигателей внешнего сгорания, в том, что из-за отделения котла от паровой машины можно использовать практически любой вид топлива (источник тепла) — от [кизяка](#) до [урана](#). Это отличает их от двигателей внутреннего сгорания, каждый тип которых требует использования определённого вида топлива. Наиболее заметно это преимущество при использовании ядерной энергии, поскольку [ядерный реактор](#) не в состоянии генерировать механическую энергию, а производит только тепло, которое используется для выработки пара, приводящего в движение паровые машины (обычно паровые турбины). Кроме того, есть и другие источники тепла, которые не могут быть использованы в двигателях внутреннего сгорания, например, [солнечная энергия](#). Интересным направлением является использование энергии разности температур [Мирового океана](#) на разных глубинах.
- Подобными свойствами также обладают другие типы двигателей внешнего сгорания, такие как [двигатель Стирлинга](#), которые могут обеспечить весьма высокую эффективность, но имеют существенно **больше вес и размеры, чем современные типы паровых двигателей.**

1 — турбина высокого давления; 2 — турбина низкого давления; 3 — подшипник вала турбины; 4 — редуктор; 5 — подшипник вала с фундаментом; 6 — подшипник вала турбины; 7 — гребной винт; 8 — управляющий клапан переднего хода; 9 — управляющий клапан заднего хода.

Рисунок 4

## ПАРОВЫЯ МАШИНЫ II.

- Паровые локомотивы неплохо показывают себя на больших высотах, поскольку эффективность их работы не падает, а наоборот, возрастает в связи с низким атмосферным давлением. Паровозы до сих пор используются в горных районах Латинской Америки и Китая, несмотря на то, что в равнинной местности они давно были заменены более современными типами локомотивов.
- В Швейцарии (Brienz Rothhorn) и в Австрии (Schafberg Bahn) новые паровозы, использующие сухой пар, доказали свою эффективность. Этот тип паровоза был разработан на основе моделей Swiss Locomotive and Machine Works (SLM) 1930-х годов, со множеством современных усовершенствований, таких, как использование роликовых подшипников, современная теплоизоляция, сжигание в качестве топлива лёгких нефтяных фракций, улучшенные паропроводы, и т. д. В результате такие паровозы имеют на 60 % меньшее потребление топлива и значительно меньшие требования к обслуживанию. Экономические качества таких паровозов сравнимы с современными тепловозами и электровозами.
- Кроме того, паровые локомотивы значительно легче, чем дизельные и электрические, что особенно актуально для горных железных дорог. Особенностью паровых двигателей является то, что они не нуждаются в трансмиссии, передавая усилие непосредственно на колёса.

2. Горизонтальная паровая машина Вулфа.

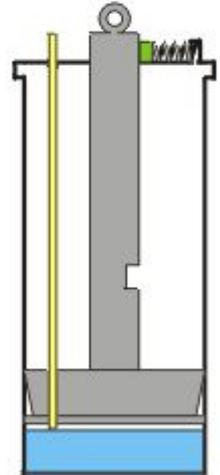
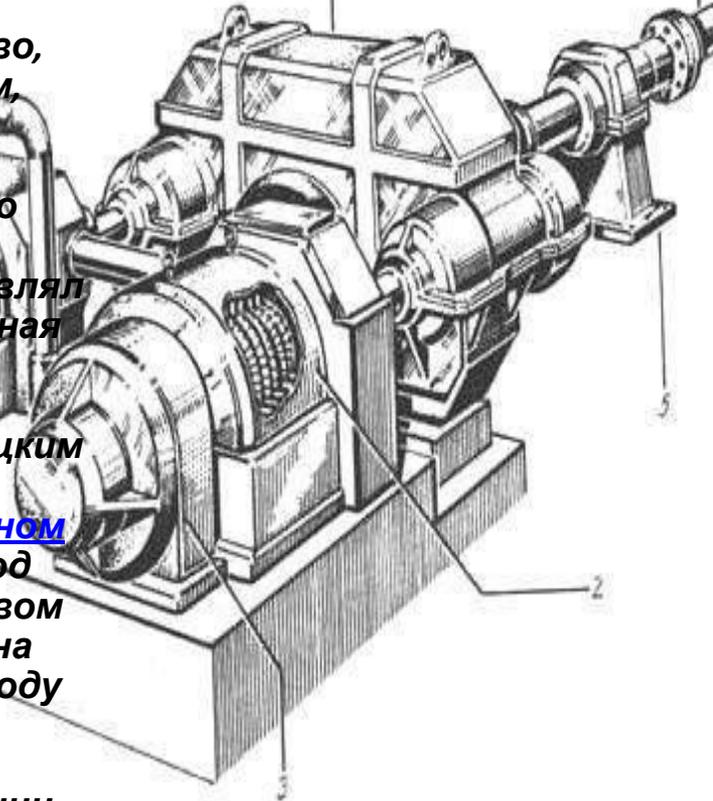
3. Вертикальная паровая машина.

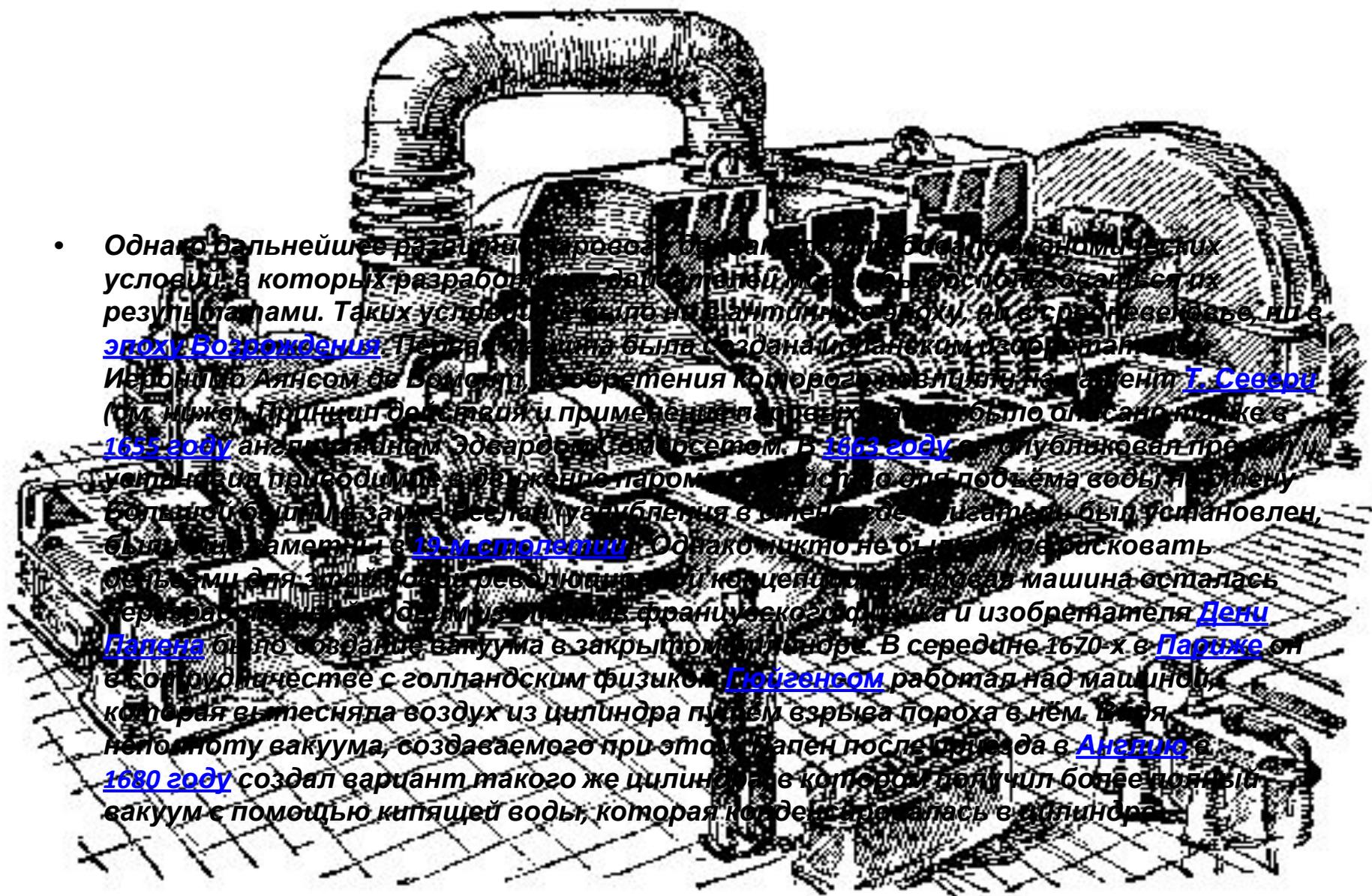
# Изобретение и развитие

- Первое известное устройство, приводимое в движение паром, было описано [Героном Александрийским](#) в первом столетии. Пар, выходящий по касательной из [дюз](#), закреплённых на шаре, заставлял последний вращаться. Реальная [паровая турбина](#) была изобретена намного позже, в средневековом [Египте](#), турецким астрономом, физиком и инженером [XVI века Такиюддином аш-Шами](#). Он предложил метод вращения вертела посредством потока пара, направляемого на лопасти, закреплённые по ободу колеса. Подобную машину предложил в [1629 году итальянский инженер Джованни Бранка](#) для вращения цилиндрического анкерного устройства, которое поочерёдно поднимало и опускало паровые [песты](#) в [ступях](#). Паровой поток в

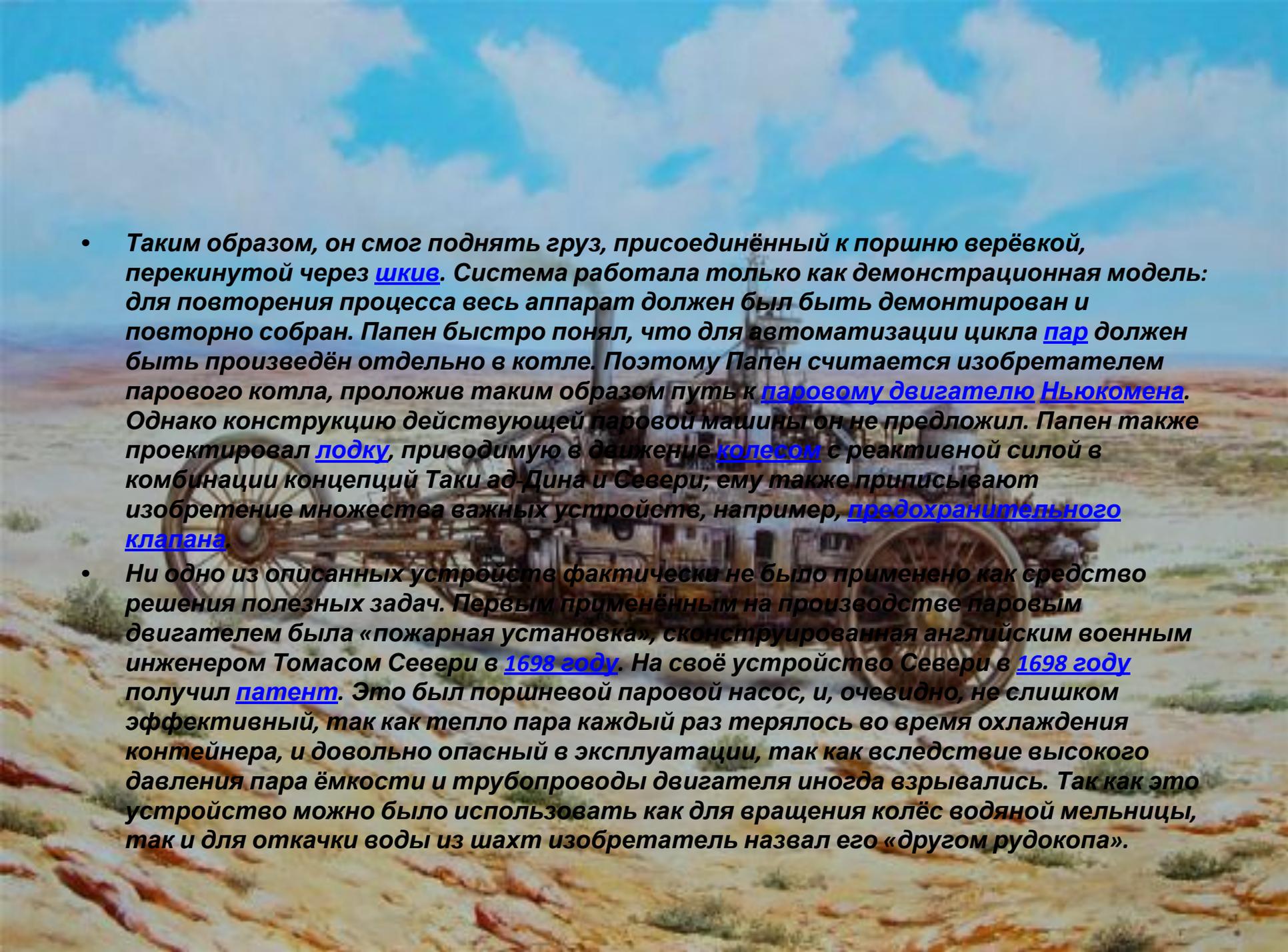
1 — турбина высокого давления; 2 — турбина низкого давления; 3 — подшипник вала турбины; 4 — редуктор; 5 — подшипник вала с фундаментом; 6 — подшипник вала турбины; 7 — гребной винт; 8 — управляющий клапан переднего хода; 9 — управляющий клапан заднего хода.

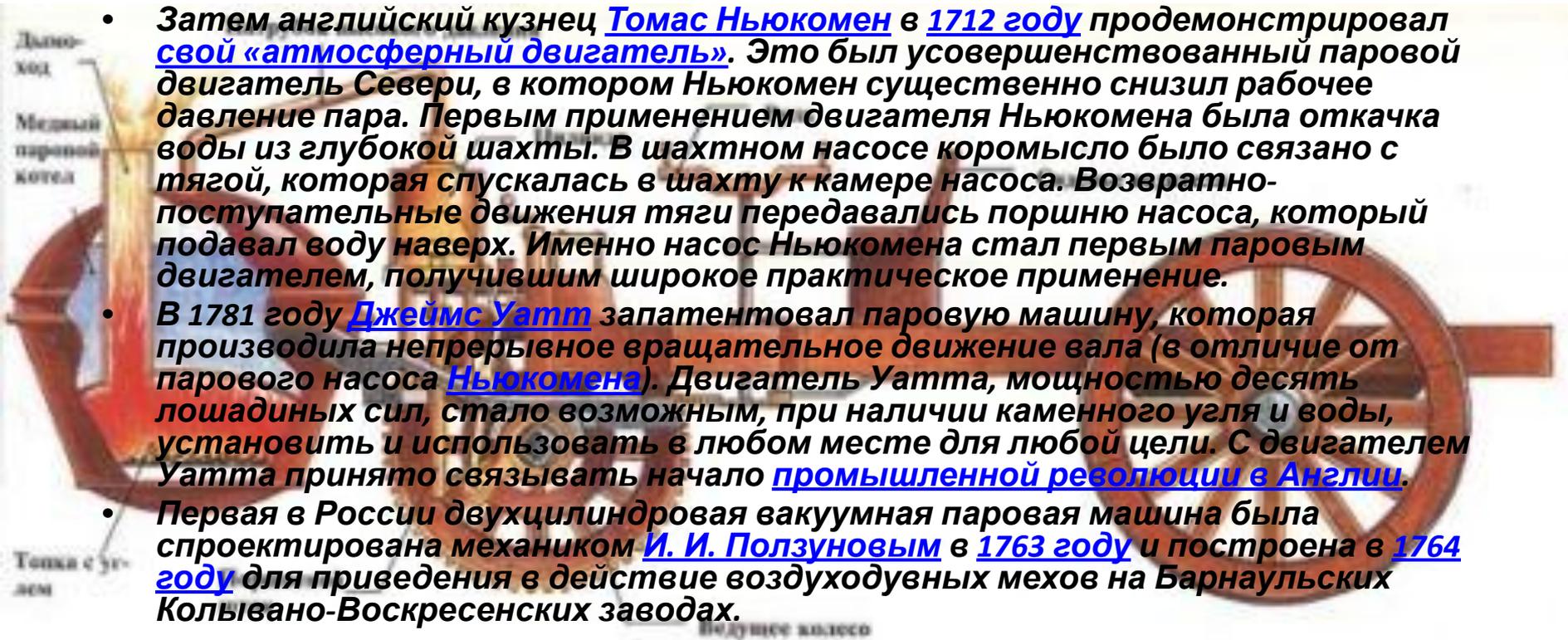
Рисунок 4



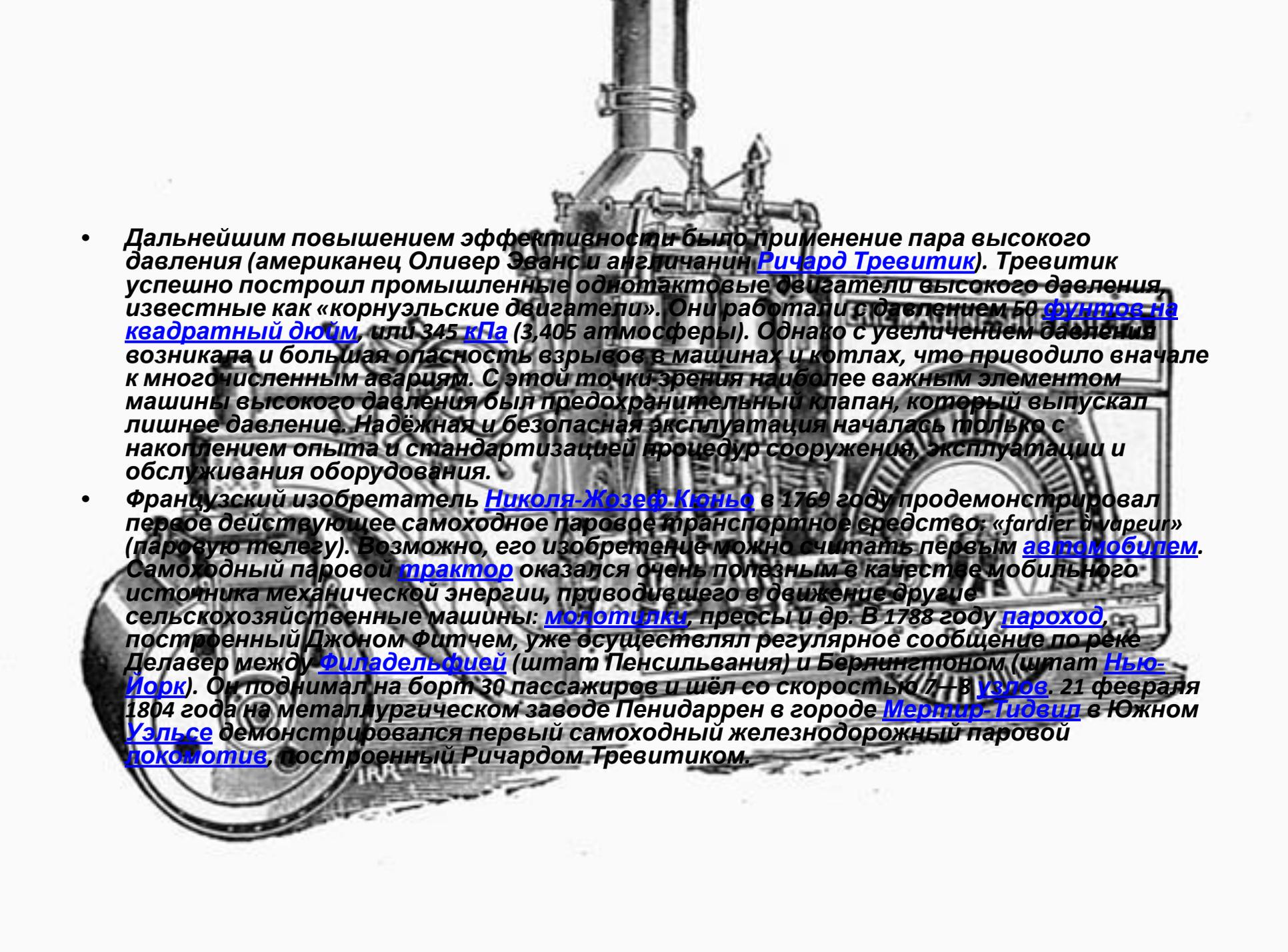


- Однако дальнейшее развитие парового двигателя требовало особых условий, в которых разработчики-изобретатели могли воспользоваться их результатами. Таких условий не было ни в античную эпоху, ни в средневековье, ни в [эпоху Возрождения](#). Первая машина была создана голландским изобретателем Иеронимом Аянсом де Вандером, изобретения которого повлияли на изобретения [Т. Севери](#) (см. ниже). Принцип действия и применение парового двигателя было описано также в [1655 году](#) английским инженером Эдвардом Сэмюэлем. В [1663 году](#) он опубликовал проект и условия применения в движенье паром, который использовался для подъема воды на высоту. Большой успех имел проект в Антверпене, где двигатель был установлен, были сделаны заметки в [19-м столетии](#). Однако никто не был готов рискнуть объемом для этой революции. В конце 17-го века паровая машина осталась неразработанной. Одним из изобретателей французского двигателя и изобретателя [Дени Папена](#) было создание вакуума в закрытом цилиндре. В середине 1670-х в [Париже](#) он в сотрудничестве с голландским физиком [Гюйгенсом](#) работал над машиной, которая вытесняла воздух из цилиндра путем взрыва пороха в нем. Из-за неполноты вакуума, создаваемого при этом, Папен последовал в [Англию](#) в [1680 году](#) создал вариант такого же цилиндра, в котором получил более полный вакуум с помощью кипящей воды, которая конденсировалась в цилиндре.

- 
- A steam engine mounted on a wooden cart is shown in a desert landscape under a blue sky with white clouds. The engine has a large boiler, a tall chimney, and various mechanical components. The cart has large wooden wheels. The background shows a vast, arid plain with some sparse vegetation.
- Таким образом, он смог поднять груз, присоединённый к поршню верёвкой, перекинутой через [шкив](#). Система работала только как демонстрационная модель: для повторения процесса весь аппарат должен был быть демонтирован и повторно собран. Папен быстро понял, что для автоматизации цикла [пар](#) должен быть произведён отдельно в котле. Поэтому Папен считается изобретателем парового котла, проложив таким образом путь к [паровому двигателю Ньюкомена](#). Однако конструкцию действующей паровой машины он не предложил. Папен также проектировал [лодку](#), приводимую в движение [колёсом](#) с реактивной силой в комбинации концепций Таки ад-Дина и Севери; ему также приписывают изобретение множества важных устройств, например, [предохранительного клапана](#).
  - Ни одно из описанных устройств фактически не было применено как средство решения полезных задач. Первым применённым на производстве паровым двигателем была «пожарная установка», сконструированная английским военным инженером Томасом Севери в [1698 году](#). На своё устройство Севери в [1698 году](#) получил [патент](#). Это был поршневой паровой насос, и, очевидно, не слишком эффективный, так как тепло пара каждый раз терялось во время охлаждения контейнера, и довольно опасный в эксплуатации, так как вследствие высокого давления пара ёмкости и трубопроводы двигателя иногда взрывались. Так как это устройство можно было использовать как для вращения колёс водяной мельницы, так и для откачки воды из шахт изобретатель назвал его «другом рудокопа».

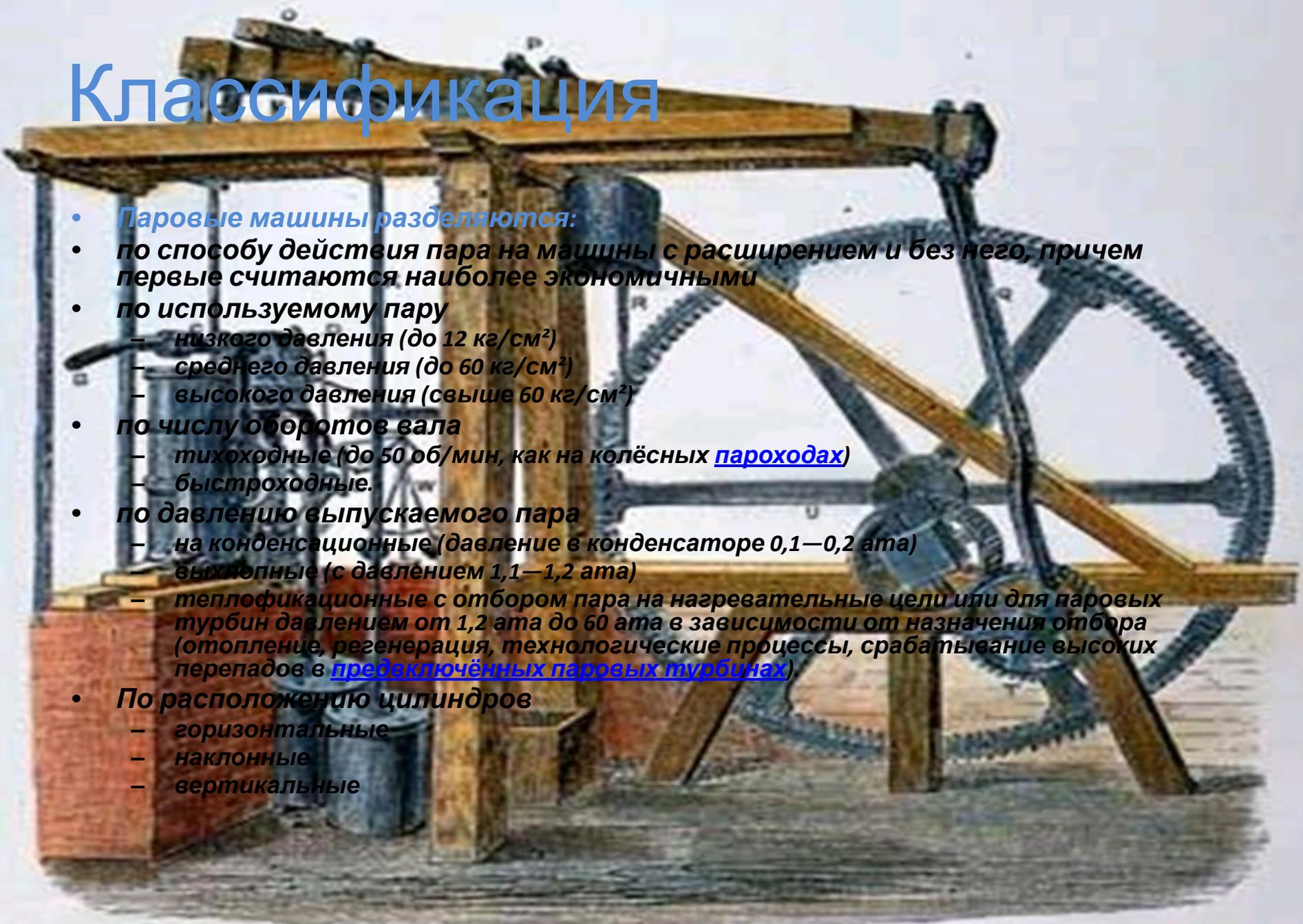


- Затем английский кузнец **Томас Ньюкомен** в **1712 году** продемонстрировал свой **«атмосферный двигатель»**. Это был усовершенствованный паровой двигатель Севери, в котором Ньюкомен существенно снизил рабочее давление пара. Первым применением двигателя Ньюкомена была откачка воды из глубокой шахты. В шахтном насосе коромысло было связано с тягой, которая спускалась в шахту к камере насоса. Возвратно-поступательные движения тяги передавались поршню насоса, который подавал воду наверх. Именно насос Ньюкомена стал первым паровым двигателем, получившим широкое практическое применение.
- В 1781 году **Джеймс Уатт** запатентовал паровую машину, которая производила непрерывное вращательное движение вала (в отличие от парового насоса **Ньюкомена**). Двигатель Уатта, мощностью десять лошадиных сил, стало возможным, при наличии каменного угля и воды, установить и использовать в любом месте для любой цели. С двигателем Уатта принято связывать начало **промышленной революции в Англии**.
- Первая в России двухцилиндровая вакуумная паровая машина была спроектирована механиком **И. И. Ползуновым** в **1763 году** и построена в **1764 году** для приведения в действие воздуходувных мехов на Барнаульских Колывано-Воскресенских заводах.

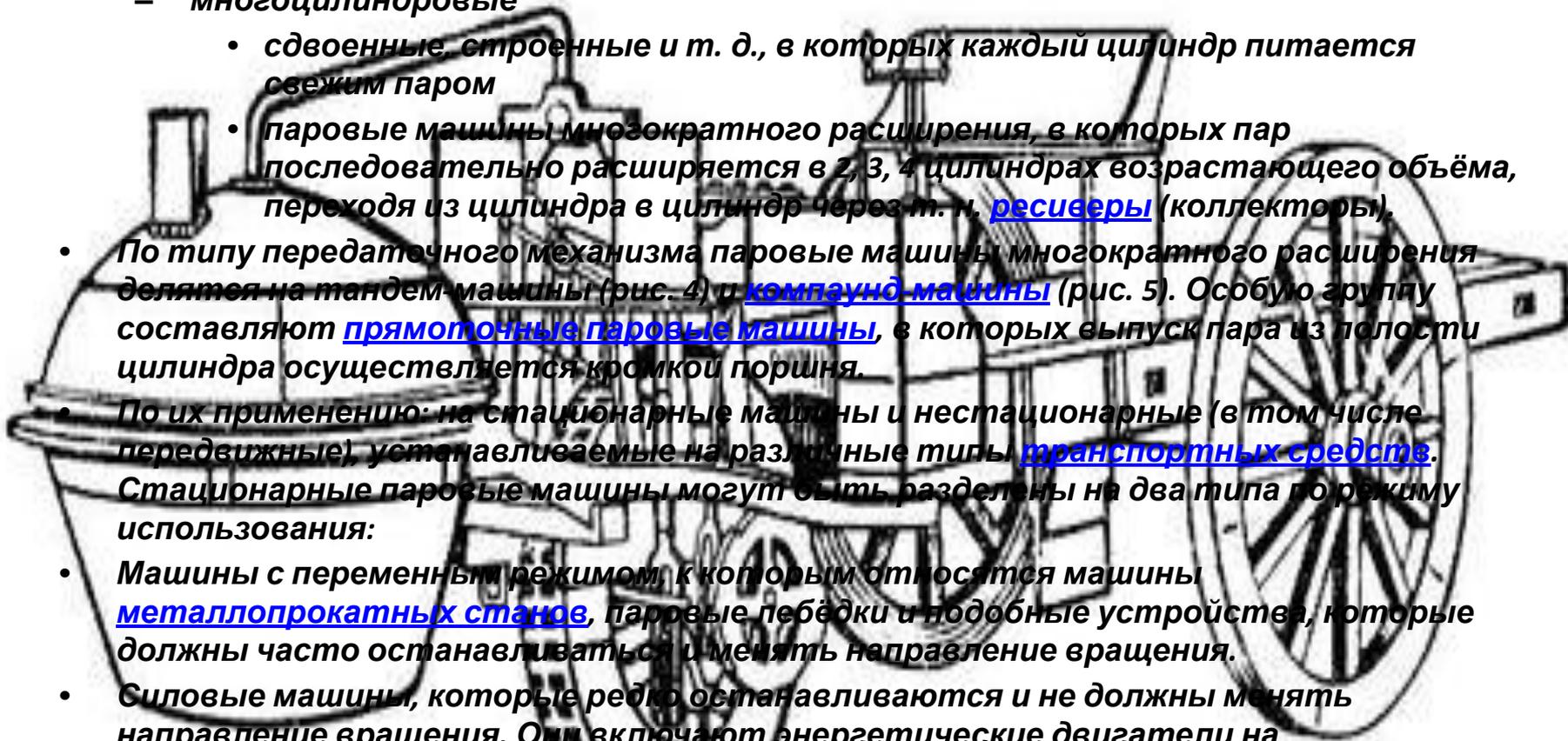
- 
- Дальнейшим повышением эффективности было применение пара высокого давления (американец Оливер Эванс и англичанин [Ричард Тревитик](#)). Тревитик успешно построил промышленные однитактовые двигатели высокого давления, известные как «корнуэльские двигатели». Они работали с давлением 50 [фунтов на квадратный дюйм](#), или 345 [кПа](#) (3,405 атмосферы). Однако с увеличением давления возникала и большая опасность взрывов в машинах и котлах, что приводило вначале к многочисленным авариям. С этой точки зрения наиболее важным элементом машины высокого давления был предохранительный клапан, который выпускал лишнее давление. Надёжная и безопасная эксплуатация началась только с накоплением опыта и стандартизацией процедур сооружения, эксплуатации и обслуживания оборудования.
  - Французский изобретатель [Николя-Жозеф Кюньо](#) в 1769 году продемонстрировал первое действующее самоходное паровое транспортное средство: «fardier à vapeur» (паровую телегу). Возможно, его изобретение можно считать первым [автомобилем](#). Самоходный паровой [трактор](#) оказался очень полезным в качестве мобильного источника механической энергии, приводившего в движение другие сельскохозяйственные машины: [молотилки](#), прессы и др. В 1788 году [пароход](#), построенный Джоном Фитчем, уже осуществлял регулярное сообщение по реке Делавер между [Филадельфией](#) (штат Пенсильвания) и Берлингтоном (штат [Нью-Йорк](#)). Он поднимал на борт 30 пассажиров и шёл со скоростью 7–8 [узлов](#). 21 февраля 1804 года на металлургическом заводе Пенидаррен в городе [Мертир-Тидвил](#) в Южном [Уэльсе](#) демонстрировался первый самоходный железнодорожный паровой [покойтив](#), построенный Ричардом Тревитиком.

# Классификация

- **Паровые машины разделяются:**
- по способу действия пара на машины с расширением и без него, причем первые считаются наиболее экономичными
- по используемому пару
  - низкого давления (до 12 кг/см<sup>2</sup>)
  - среднего давления (до 60 кг/см<sup>2</sup>)
  - высокого давления (свыше 60 кг/см<sup>2</sup>)
- по числу оборотов вала
  - тихоходные (до 50 об/мин, как на колёсных [пароходах](#))
  - быстроходные.
- по давлению выпускаемого пара
  - на конденсационные (давление в конденсаторе 0,1—0,2 ата)
  - выхлопные (с давлением 1,1—1,2 ата)
  - теплофикационные с отбором пара на нагревательные цели или для паровых турбин давлением от 1,2 ата до 60 ата в зависимости от назначения отбора (отопление, регенерация, технологические процессы, срабатывание высоких перепадов в [предключённых паровых турбинах](#)).
- По расположению цилиндров
  - горизонтальные
  - наклонные
  - вертикальные

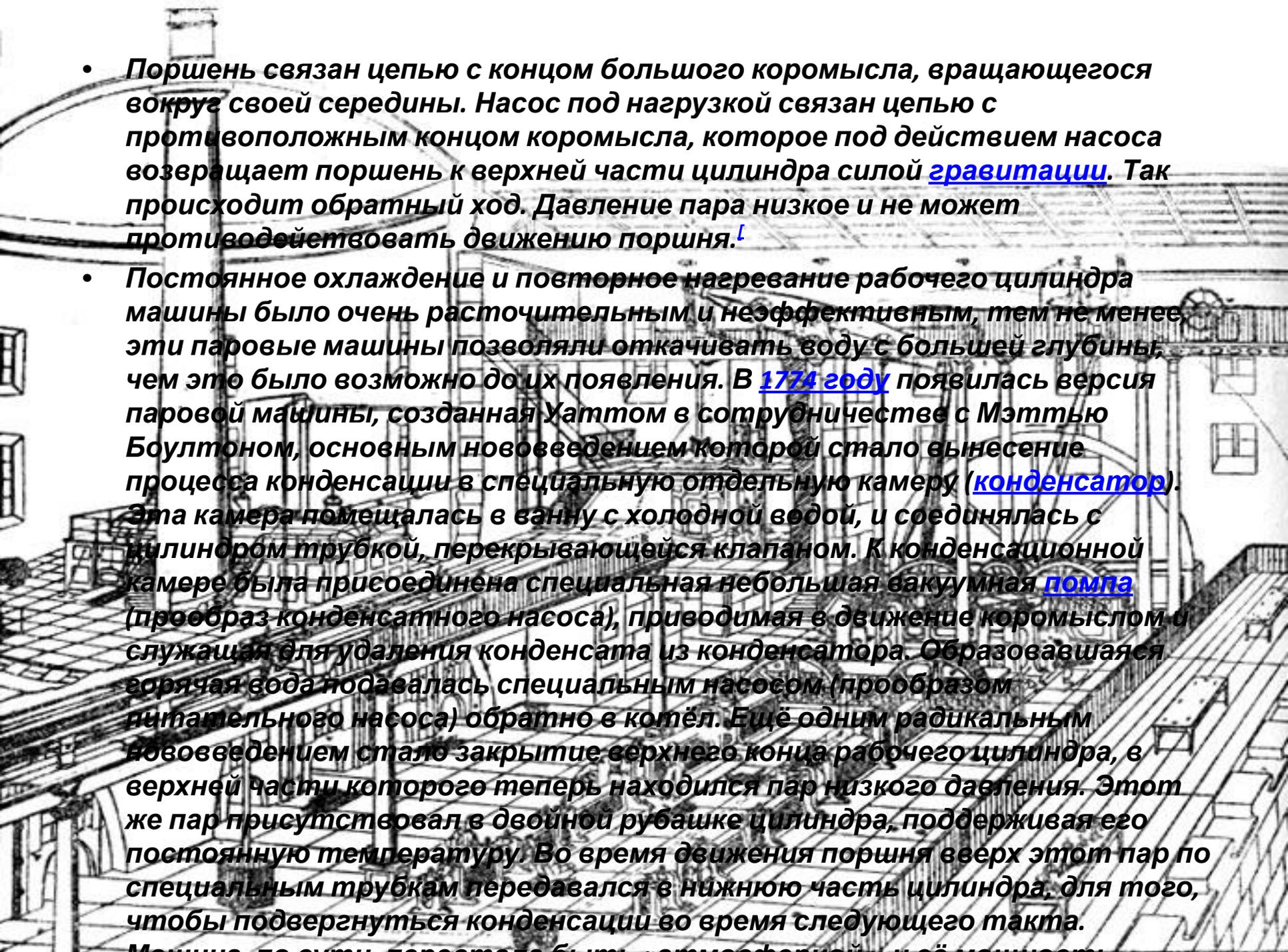


- по числу цилиндров
  - одноцилиндровые
  - многоцилиндровые
    - *сдвоенные, строенные и т. д., в которых каждый цилиндр питается свежим паром*
    - *паровые машины многократного расширения, в которых пар последовательно расширяется в 2, 3, 4 цилиндрах возрастающего объёма, переходя из цилиндра в цилиндр через т. н. ресиверы (коллекторы).*
- По типу передаточного механизма паровые машины многократного расширения делятся на *тандем-машины* (рис. 4) и компаунд-машины (рис. 5). Особую группу составляют прямоточные паровые машины, в которых выпуск пара из полости цилиндра осуществляется кромкой поршня.
- По их применению: на стационарные машины и нестационарные (в том числе передвижные), устанавливаемые на различные типы транспортных средств. Стационарные паровые машины могут быть разделены на два типа по режиму использования:
  - *Машины с переменным режимом, к которым относятся машины металлопрокатных станков, паровые лебёдки и подобные устройства, которые должны часто останавливаться и менять направление вращения.*
  - *Силовые машины, которые редко останавливаются и не должны менять направление вращения. Они включают энергетические двигатели на электростанциях, а также промышленные двигатели, использовавшиеся на заводах, фабриках и на кабельных железных дорогах до широкого распространения электрической тяги. Двигатели малой мощности используются на судовых моделях и в специальных устройствах.*
- *Паровая лебёдка в сущности является стационарным двигателем, но установлена на опорной раме, чтобы её можно было перемещать. Она может быть закреплена тросом за якорь и передвинута собственной тягой на новое место.*

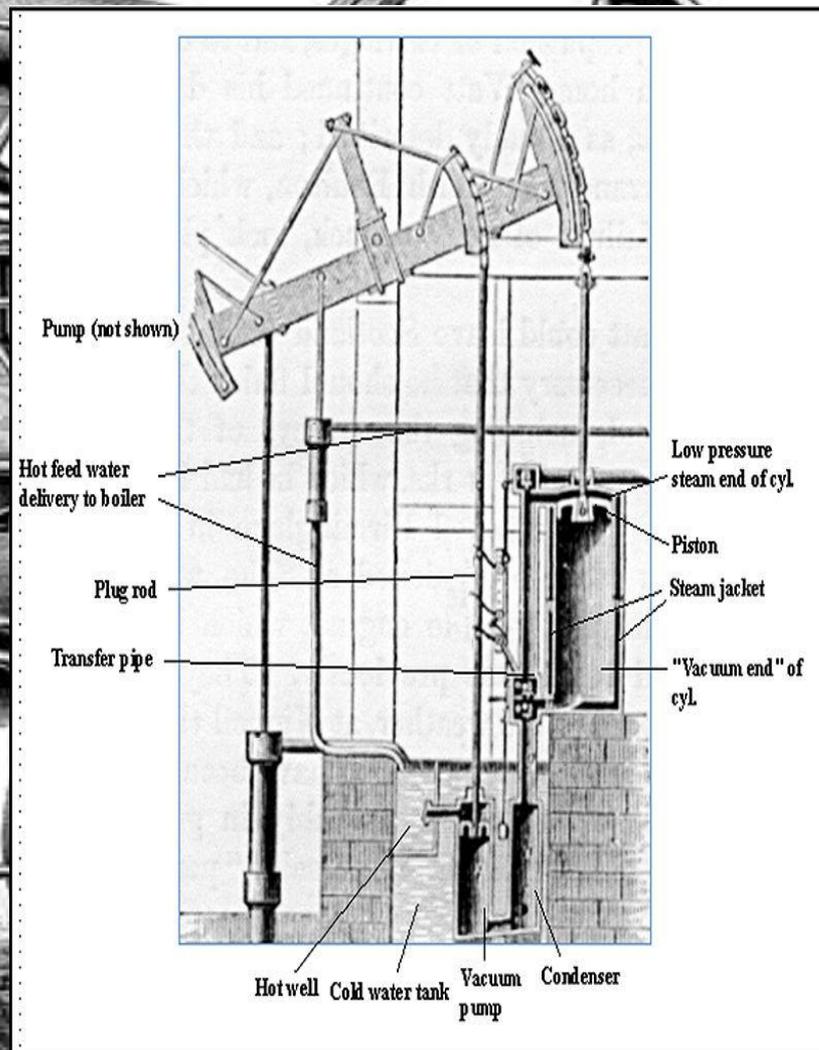


# Паровые машины с возвратно-поступательным движением

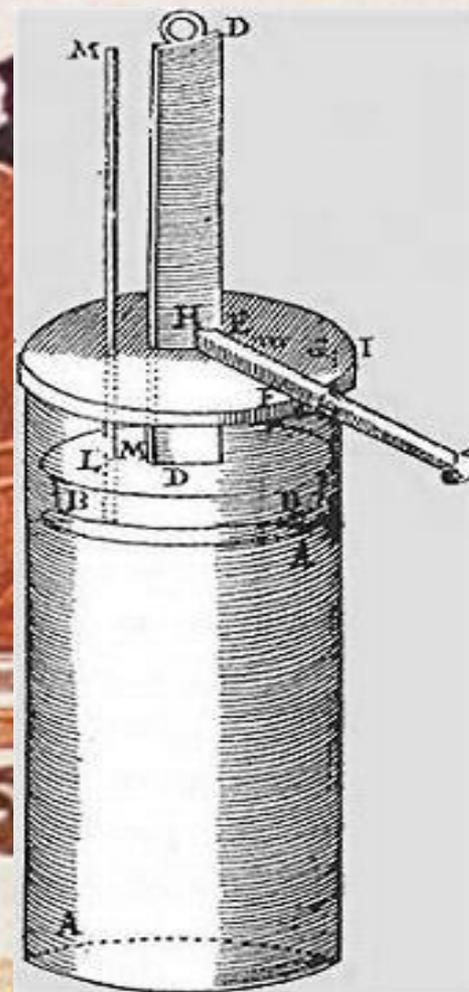
- Двигатели с возвратно-поступательным движением используют энергию пара для перемещения поршня в герметичной камере или цилиндре. Возвратно-поступательное действие поршня может быть механически преобразовано в линейное движение поршневых насосов или во вращательное движение для привода вращающихся частей станков или колёс транспортных средств.
- **Вакуумные машины**
- Ранние паровые машины назывались вначале «[огневыми](#) машинами», а также «[атмосферными](#)» или «конденсирующими» двигателями Уатта. Они работали на [вакуумном](#) принципе и поэтому известны также как «вакуумные двигатели». Такие машины работали для привода поршневых [насосов](#), во всяком случае, нет никаких свидетельств о том, что они использовались в иных целях. При работе паровой машины вакуумного типа в начале такта пар низкого давления впускается в рабочую камеру или цилиндр. Впускной клапан после этого закрывается, и пар охлаждается, конденсируясь. В [двигателе Ньюкомена](#) охлаждающая вода распыляется непосредственно в цилиндр, и конденсат сбегает в сборник конденсата. Таким образом создаётся вакуум в цилиндре. Атмосферное давление в верхней части цилиндра давит на поршень, и вызывает его перемещение вниз, то есть рабочий ход.

- 
- Поршень связан цепью с концом большого коромысла, вращающегося вокруг своей середины. Насос под нагрузкой связан цепью с противоположным концом коромысла, которое под действием насоса возвращает поршень к верхней части цилиндра силой [гравитации](#). Так происходит обратный ход. Давление пара низкое и не может противодействовать движению поршня.!
  - Постоянное охлаждение и повторное нагревание рабочего цилиндра машины было очень расточительным и неэффективным, тем не менее, эти паровые машины позволяли откачивать воду с большей глубины, чем это было возможно до их появления. В [1774 году](#) появилась версия паровой машины, созданная Уаттом в сотрудничестве с Мэттью Боултоном, основным нововведением которой стало вынесение процесса конденсации в специальную отдельную камеру ([конденсатор](#)). Эта камера помещалась в ванну с холодной водой, и соединялась с цилиндром трубкой, перекрывающейся клапаном. К конденсационной камере была присоединена специальная небольшая вакуумная [помпа](#) (прообраз конденсатного насоса), приводимая в движение коромыслом и служащая для удаления конденсата из конденсатора. Образовавшаяся горячая вода подавалась специальным насосом (прообразом питательного насоса) обратно в котёл. Ещё одним радикальным нововведением стало закрытие верхнего конца рабочего цилиндра, в верхней части которого теперь находился пар низкого давления. Этот же пар присутствовал в двойной рубашке цилиндра, поддерживая его постоянную температуру. Во время движения поршня вверх этот пар по специальным трубкам передавался в нижнюю часть цилиндра, для того, чтобы подвергнуться конденсации во время следующего такта. Механизм по сути переделан бы...

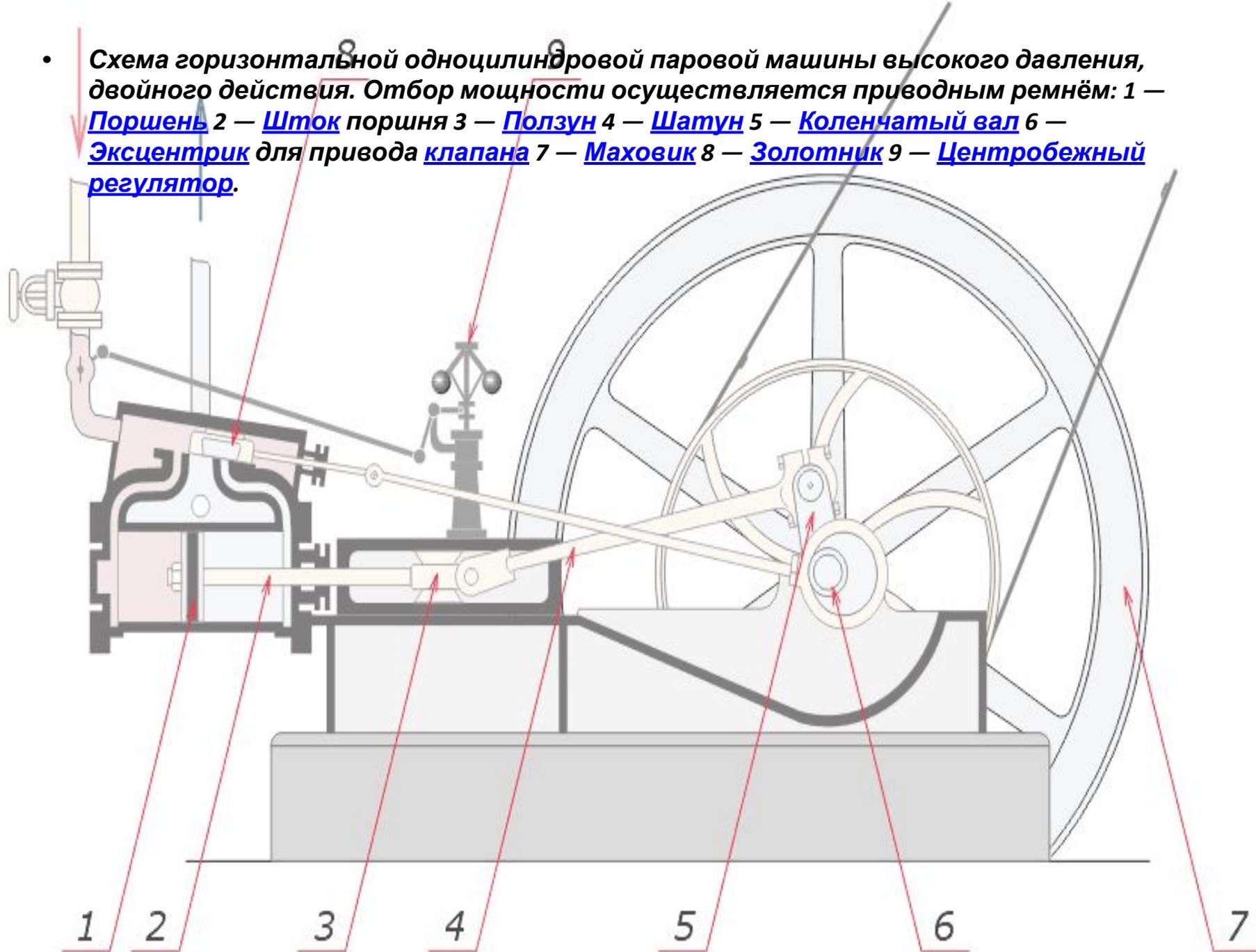
В паровой машине Ньюкомена смазка поршня осуществлялась небольшим количеством налитой на него сверху воды, в машине Уатта это стало невозможным, поскольку в верхней части цилиндра теперь находился пар, пришлось перейти на смазку смесью тавота и нефти. Такая же смазка использовалась в сальнике штока цилиндра. Вакуумные паровые машины, несмотря на очевидные ограничения их эффективности, были относительно безопасны, использовали пар низкого давления, что вполне соответствовало общему невысокому уровню котельных технологий XVIII века. Мощность машины ограничивалась низким давлением пара, размерами цилиндра, скоростью сгорания топлива и испарения воды в котле, а также размерами конденсатора. Максимальный теоретический КПД был ограничен относительно малой разницей температур по обе стороны поршня, это делало



- Приблизительно в [1811 году](#) [Ричард Тревитик](#) усовершенствовал машину Уатта. Давление пара над поршнем достигло 275 кПа (2,8 атмосферы), и именно оно давало основную мощность для совершения рабочего хода; кроме того, был существенно усовершенствован конденсатор. Такие машины получили название [корнуэльских<sup>\[en\]</sup>](#), и строились вплоть до 1890-х годов. Множество старых машин Уатта было реконструировано до этого уровня. Некоторые из корнуэльских машин имели весьма большой размер.

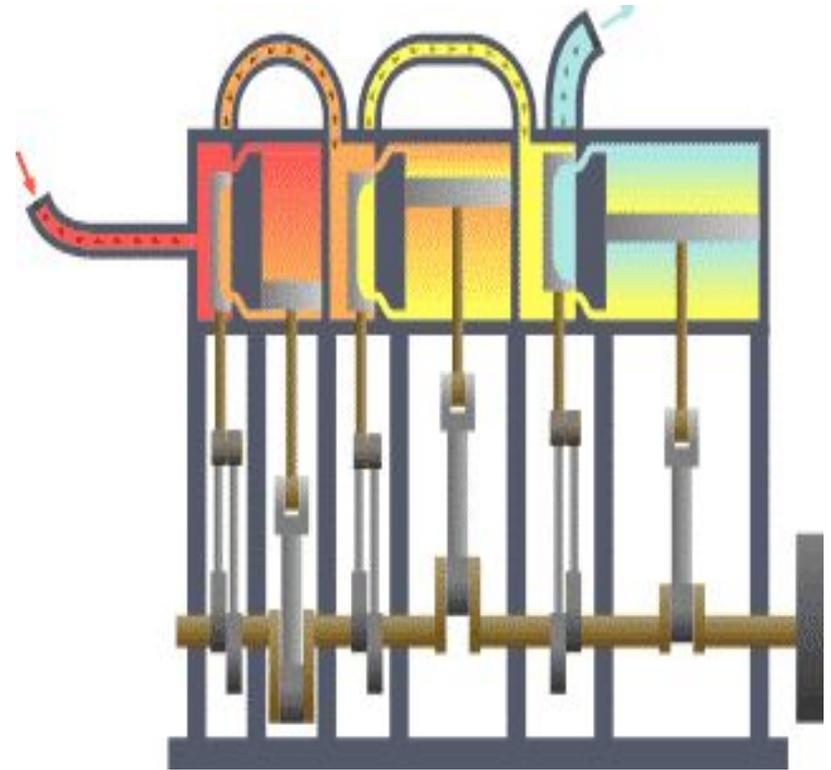


- **Схема горизонтальной одноцилиндровой паровой машины высокого давления, двойного действия. Отбор мощности осуществляется приводным ремнём: 1 — Поршень 2 — Шток поршня 3 — Ползун 4 — Шатун 5 — Коленчатый вал 6 — Эксцентрик для привода клапана 7 — Маховик 8 — Золотник 9 — Центробежный регулятор.**

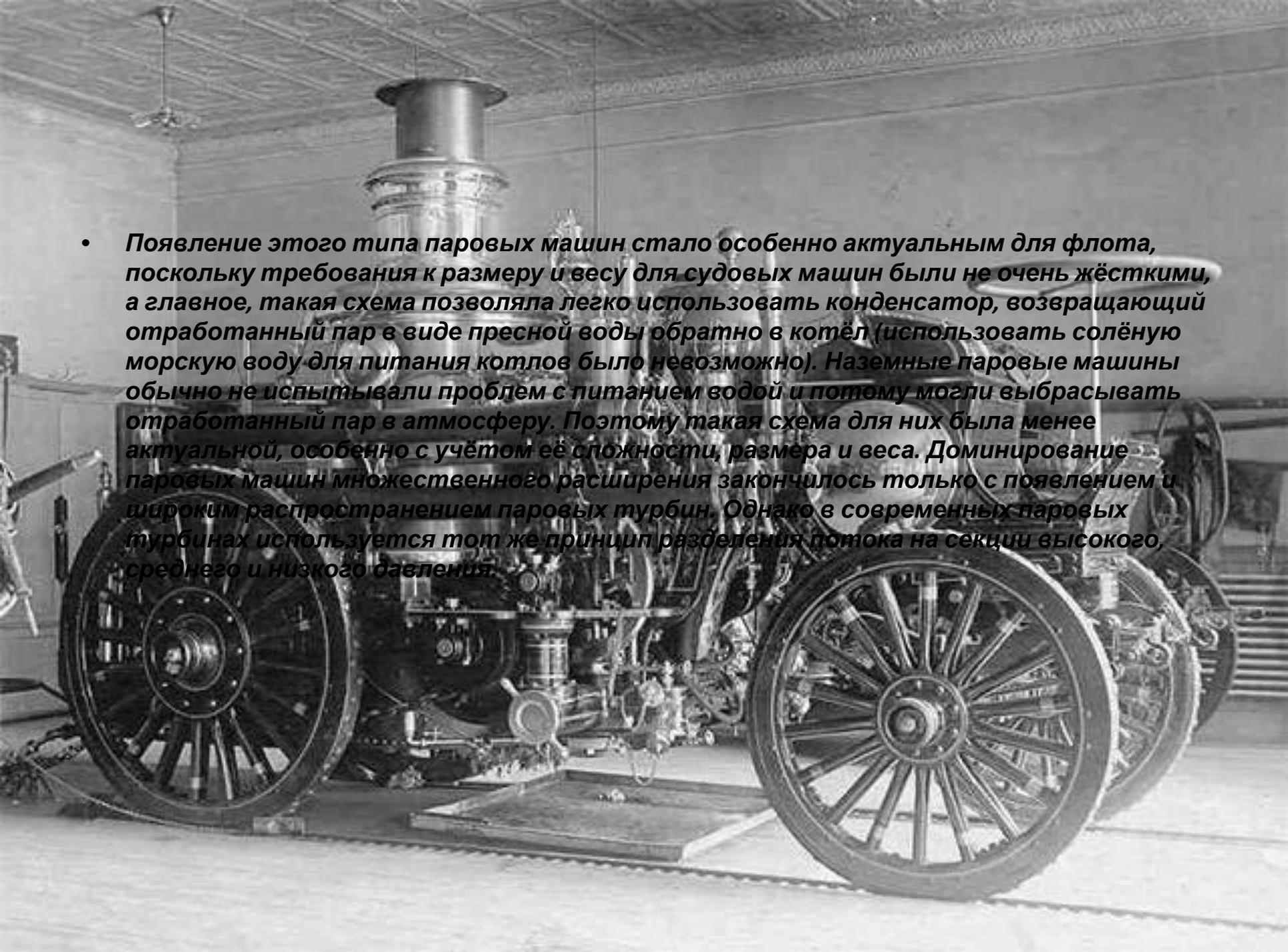


# Множественное расширение

Логичным развитием схемы компаунда стало добавление в неё дополнительных стадий расширения, что увеличивало эффективность работы. Результатом стала схема множественного расширения, известная как машины тройного или даже четырёхкратного расширения. Такие паровые машины использовали серии цилиндров двойного действия, объём которых увеличивался с каждой стадией. Иногда вместо увеличения объёма цилиндров низкого давления использовалось увеличение их количества, так же, как и на некоторых компаундных машинах. Изображение справа показывает работу паровой машины с тройным расширением. Пар проходит через машину слева направо. Блок клапанов каждого цилиндра расположен слева от соответствующего цилиндра.



- ***Появление этого типа паровых машин стало особенно актуальным для флота, поскольку требования к размеру и весу для судовых машин были не очень жёсткими, а главное, такая схема позволяла легко использовать конденсатор, возвращающий отработанный пар в виде пресной воды обратно в котёл (использовать солёную морскую воду для питания котлов было невозможно). Наземные паровые машины обычно не испытывали проблем с питанием водой и потому могли выбрасывать отработанный пар в атмосферу. Поэтому такая схема для них была менее актуальной, особенно с учётом её сложности, размера и веса. Доминирование паровых машин множественного расширения закончилось только с появлением и широким распространением паровых турбин. Однако в современных паровых турбинах используется тот же принцип разделения потока на секции высокого, среднего и низкого давления.***



# Прямоточные паровые машины

Прямоточные паровые машины возникли в результате попытки преодолеть один недостаток, свойственный паровым машинам с традиционным парораспределением. Дело в том, что пар в обычной паровой машине постоянно меняет направление своего движения, поскольку и для впуска и для выпуска пара применяется одно и то же окно с каждой стороны цилиндра. Когда отработанный пар покидает цилиндр, он охлаждает его стенки и парораспределительные каналы. Свежий пар, соответственно, тратит определённую часть энергии на их нагревание, что приводит к падению эффективности. Прямоточные паровые машины имеют дополнительное окно, которое открывается поршнем в конце каждой фазы, и через которое пар покидает цилиндр. Это повышает эффективность машины, поскольку пар движется в одном направлении, и температурный градиент стенок цилиндра остаётся более или менее постоянным. Прямоточные машины одиночного расширения показывают примерно такую же эффективность, как компаундные машины с обычным парораспределением. Кроме того, они могут работать на более высоких оборотах, и потому до появления паровых турбин часто применялись для привода электрогенераторов, требующих высокой

