

# Появление теории автоматического регулирования (ТАР)

(Работы Д.-К.Максвелла, И.А.Вышнеградского, А.Стодолы, заложивших основу ТАР)

## **1 - История создания паровой машины – универсального промышленного двигателя**

### **1.1. Игрушки и легенды**

О могучей силе пара люди догадывались еще в глубокой древности. Наиболее известен в этой области живший в 7-м веке до нашей эры Герон Александрийский – автор многочисленных трактатов, дошедших до нас в арабских и греческих переводах. В одном из них описан эолопил – медный шар, вращающийся под действием пара, выходящего из двух расположенных по бокам изогнутых трубок. Другая игрушка – фонтанчик, в которой закипающая в закрытом сосуде вода сама фонтанирует через впаянную в него трубку. Впечатляли устройства, с помощью которых как бы сами открывались двери храмов, когда разводили огонь на жертвенном месте. Существует легенда об изобретенной Героном некоей машине, установленной на Форосском маяке (одно из чудес Света) и поднимавшей с помощью огня и воды дрова и бочонки с маслом.

Леонардо да Винчи описывает изобретенную якобы Архимедом (через четыре века после Герона) паровую пушку – архитронито. По его словам, архитронито представляло собой устройство из меди, которое с помощью пара метала железные ядра весом в один талан (40 кг) с большим шумом и большой силой на расстояние в шесть стадий (1 км.).

### **1.2. Паровая машина - насос**

Научная революция XVI – XVII, связанная с именами Коперника, Галилея, Бекона, Гильберта и других, разорвала оковы средневековой схоластики, выплеснула творческий гений тысяч и тысяч инженеров, ученых, мыслителей. Не всем им суждено было кануть в безвестности.

В 1965 году во Франкфурте вышла книга занимавшегося устройством фонтанов в поместьях знатных особ французского инженера и архитектора Соломона де Ко «Причины движущих сил с различными полезными и забавными историями». В книге под № 5 описан «...способ поднимать воду с помощью огня. Может служить основой для различных машин...». В работе фактически описывается фонтан Герона Александрийского.

Идею использования пара для подъема воды развил англичанин Эдуард Сомерсет (лорд Вустер), второй маркиз Вустерский, живший во времена войны Карла 1 со своим парламентом. Страстное увлечение машинами и механизмами в юности сменилось не менее страстным увлечением политическими интригами, приведшими его в тюрьму, затем побег из тюрьмы во Францию, возвращение в Англию в качестве шпиона (в пользу Франции), и опять заключение в Тауэр. После освобождения в 1663 году Вустер опубликовал книгу «Век тех имен и образы тех изобретений, которые приходят мне на память». В книге под № 68 описан способ совершать работу с помощью пара.

Любопытно, что английские и французские историки техники до сих пор спорят о том, кому принадлежит приоритет в изобретении паровой машины - насоса: Соломону де Ко или Вустеру, приводя в доказательство тот или иной документ, заведомо опровергаемый противоположной стороной.

Другой претендент на звание изобретателя паровой машины - насоса тоже англичанин Сэмюэль Морленд прожил богатую приключениями жизнь: политика, изобретательская деятельность, затем опять политика, создание английской разведывательной службы (Интеллидженс сервис) и т.п. Преподнес в 1683 году королю Франции!!! Людовику XIV рукопись «Начало новой силы огня, открытой кавалерам Морлендом в 1682 году и представленной его Христианнейшему Величеству». Морленд знал работы Вустера, но считал только себя первооткрывателем идеи использования силы огня и воды для совершения работы» Морленд уже достаточно хорошо знал количественные соотношения между водой и водяным паром, однако также как и его

предшественники не оставил достаточно убедительных сведений о практическом создании какой либо машины.

Развивающаяся промышленность требовала все больше и больше энергии, которую в те времена предоставляло только водяное колесо (гидравлический двигатель). Однако использование гидравлического двигателя требовало расположения рядом с производством достаточно быстрой и полноводной реки. На шахтах, удаленных от рек использовали силу животных, что было чрезвычайно невыгодно (так, например, для откачки воды и подъема руды из шахты требовалось до 500 лошадей).

Отсутствие надежного двигателя, который мог бы работать независимо от того, есть рядом река или нет, сильно тормозило развитие текстильного производства, металлургии, горного дела.

Судовладелец, а затем капитан торгового флота англичанин Томас Севери (1650 - 1715) создал первую паровую машину-насос и получил на нее в 1699 году патент. Патент, полученный Севери, гласил: «Это – новое изобретение для подъема воды и получения движения для всех видов производства при помощи движущей силы огня имеет большое значение для осушки рудников». По своему устройству это была та же машина, которую предлагали Вустер и Морленд, но с одним очень существенным отличием - в ней впервые была использована конденсация пара за счет его охлаждения. Свою машину Севери увековечил в книге под названием «*Miner's friend*» («Друг рудокопа»).

Признанным авторитетом в постройке и усовершенствовании машин Севери стал французский ученый Дезагюлье (он предложил осуществлять конденсацию пара впрыском холодной воды), обвинивший Севери в плагиате. Дезагюлье утверждал, что Севери позаимствовал «свою» идею у Вустера, а чтобы скрыть это, скупал и уничтожал его сочинения. Машины Севери-Дезагюлье успешно работали во Франции и Голландии, а в 1717 году одна из таких машин была установлена в Летнем саду в Санкт-Петербурге (тогда в Летнем саду существовали фонтаны).

Машина представляла собой соединенный с котлом герметичный сосуд (конденсационный сосуд) с закрепленными в нем трубами: одна для всасывания воды, другая для вытеснения воды, третья для осуществления конденсации пара - впрыскивания холодной воды в сосуд, когда он заполнен паром (представлено на рисунке 1-а). После того, как сосуд заполнялся водой, в него подавался под давлением пар и вытеснял воду (клапаны 1 и 3 закрыты, 2 и 4 открыты). По окончании вытеснения воды в сосуде создавалось разрежение (впрыском небольшого количества холодной воды), под воздействием которого засасывалась вода из шахты (клапаны 2 и 4 закрыты, 1 и 3 открыты) (рис. 1-б). Затем процесс повторялся.

Хотя паровые насосы и получили некоторое распространение, сам этот принцип был малоперспективным, чтобы произвести промышленную революцию. Насос имел очень низкий коэффициент полезного действия ( $KПД = 0.3\%$ ), высота всасывания, определяемая атмосферным давлением, не могла превысить 10 метров, а подъем воды на каждые 10 метров требовал увеличение давления пара в котле на 1 ати = 98 кПа. Давление пара в котлах той поры не превышало 3 ати, в результате чего общая высота подъема воды не превышала 30 – 38 метров. Для приведения в действие станков приходилось комбинировать насос с водяным колесом, а для откачки воды из шахт (например, в Англии к 1700 году средняя глубина шахт составляла 120 метров, а к 1750 году - 200 метров) приходилось устраивать целый каскад из таких машин из-за ограниченной высоты всасывания и низкого напора. Необходим был новый подход в решении данной проблемы.

### **1.3. Пароатмосферные машины**

Научные основы нового подхода проектирования подобных машин были созданы к середине XIII века трудами Торричелли, Паскаля, Герике, Ломоносовым и др.

Размышляя над тем, почему насос для фонтана великого герцога Флорентийского не хочет всасывать воду на запланированную 15-метровую высоту, итальянский математик Эванжелиста Торричелли (*Evangelista Torricelli*, 1608 - 1647) предположил, что воздух имеет вес!

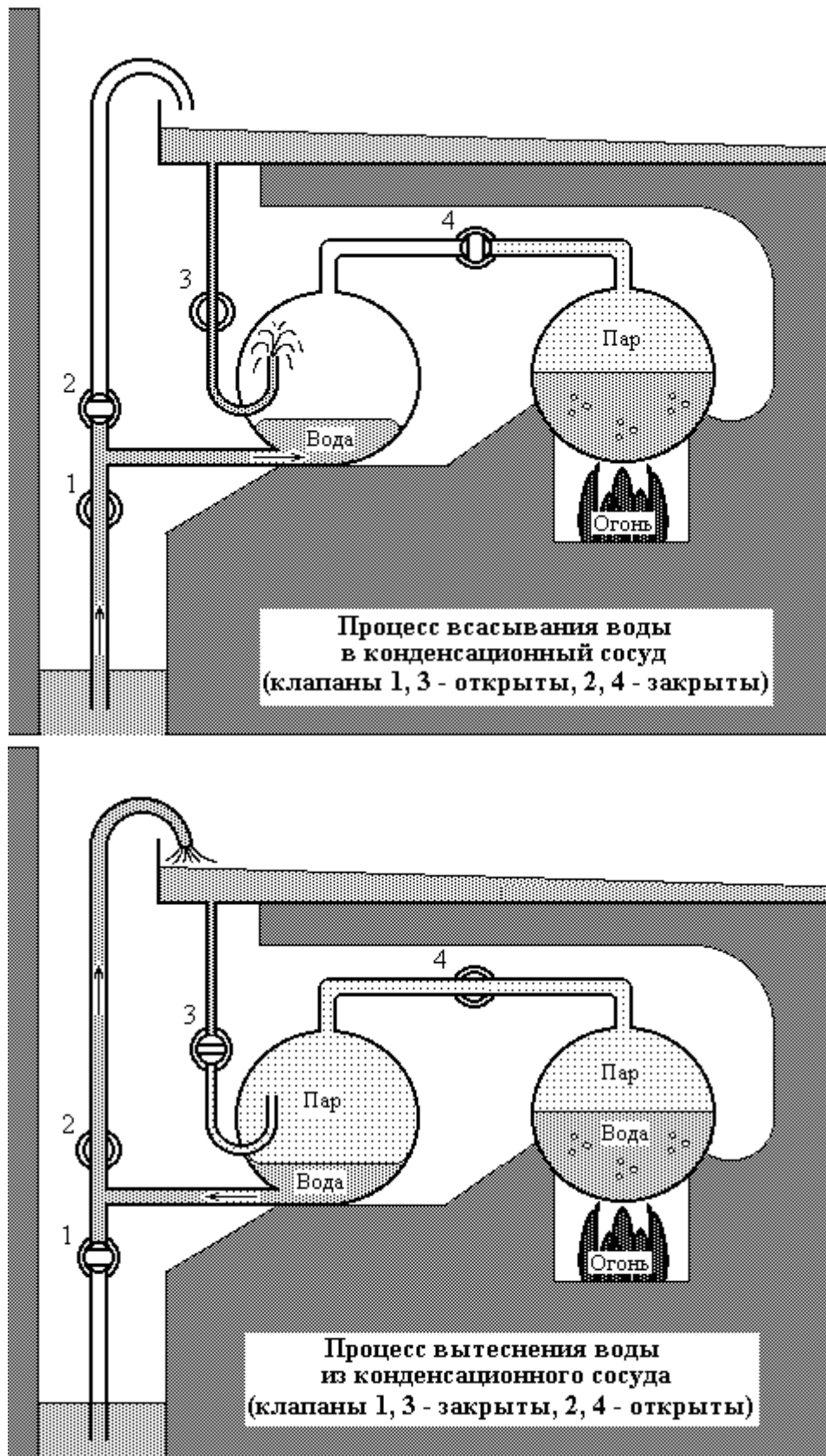


Рисунок 1- Схема работы парового насоса Севери-Дезагюлье

Для проверки гипотезы он придумал гениальный по своей простоте и убедительности опыт, который теперь известен любому школьнику (если он изучал физику).

Сразу же разгорелась яростная дискуссия между сторонниками нового учения и сторонниками аристотелевой формулы: «...природа не терпит пустоты». К последним относился и великий французский физик Блез Паскаль (Bles Pascal, 1623 - 1662), который стремясь доказать, неправоту Торричелли, провел опыт с ртутью на высокой горе Пюи-де-Дом и .... убедившись в правоте Торричелли стал ярким сторонником и пропагандистом теории атмосферного давления.

Узнав о работах Торричелли, магденбургский бургомистр и изобретательный физик-экспериментатор Отто фон Герике, используя атмосферное давление, поставил несколько впечатляющих опытов. Наиболее известен получивший название "магденбургские полушария" опыт, проведенный Герике через 11 лет после открытия, сделанного Торричелли. Другой весьма впечатляющий опыт он провел в 1654 году в Регенсбурге. Соединив полость большого шара, из которого предварительно был откачан воздух, с цилиндром, он предложил двадцати мужчинам крепко ухватиться за веревку, соединенную через блоки с поршнем этого цилиндра. Неожиданно Герике открыл кран, соединяющий шар с полостью цилиндра под поршнем, воздух ворвался в шар, поршень под действием атмосферного давления резко опустился, подняв над землей всех, кто пытался удержать его!! Путь для создания нового двигателя был открыт! И действительно, если поднять поршень, а затем создать под ним вакуум, то атмосферное давление с силой опустит его, совершив полезную работу.

В 1674 году появился труд медика по профессии и физика по призванию Дени Папена (1646 - 1714) «Новые эксперименты с вакуумом и описание машин для его производства», а в 1690 году его статья «Новый способ получать дешевой ценой большие движущие силы». Вот как описал Папен свое изобретение. «Наливаю в цилиндр немного воды, опускаю в него поршень до самой поверхности оной ... вода под действием огня начинает кипеть и обращаться в пар, который производит давление на поршень и поднимает его до верха цилиндра, преодолевая давление атмосферы... После того отнимается огонь, и пар, сгущаясь благодаря охлаждению, производит в цилиндре пустоту. Теперь машина в состоянии произвести механическое действие, ибо поршень опускается с силой, равной давлению атмосферы, и может поднимать необходимый груз при помощи веревки и блоков». Рассказывают, что Папен построил такую пароатмосферную машину и (в сочетании с гидравлическим двигателем) установил ее на своем судне, разрушенной впоследствии испугавшимися конкурентами судовладельцами. Он совершенно ясно писал о своем судне другу и советчику Готфриду Лейбницу: «Сила течения настолько ничтожна по сравнению с силой моей машины, что с трудом можно заметить более быстрый ход вниз по течению, нежели вверх. В ней заложено все нужное мореплаванию, чтобы не зависеть от течений и ветра». В 1708 году Папен предложил Лондонскому Королевскому обществу устроить соревнование двух судов, одно из которых должно было быть оборудовано машиной Папена, другое - машиной, работающей по принципу Севери: «...Если я выиграю это соревнование, и только в этом случае, я покорно прошу возместить мои расходы, затраты времени и труда...». Предложение осталось без внимания, Дени Папен к тому времени слыл неудачником, а Томас Севери уже был членом Королевского общества.

Построить первые практически работающие паротмосферные машины (рис.2) довелось английскому кузнецу Томасу Ньюкомену, который объединившись со стекольщиком Джоном Коули и самим Томасом Севери создал в 1711 году «Компанию обладания правами на изобретение установки для подъема воды посредством огня». Пар из парового котла поступает в цилиндр и поднимает поршень (клапан 2, открыт, 1 и 3 закрыты). Когда поршень достигает своего верхнего положения, в цилиндр впрыскивается холодная вода (клапан 3 открыт, 2 и 3 закрыты) пар конденсируется и атмосферное давление с силой опускает поршень, совершая работу. По достижении поршнем своего нижнего положения, открывается клапан 3 и происходит слив конденсата. Затем все повторяется вновь.

Первая пароатмосферная машина Ньюкомена начала свою работу в 1712 году на каменноугольной шахте близ Вулверхемптона (Англия), последняя закончила свою работу близ Ковентри в 1934 году!!! Пароатмосферная машина Ньюкомена, более экономичная (КПД = 1%) и простая в эксплуатации, позволявшая откачивать воду с глубины до 30 метров получила широкое распространение не только в Англии, но и во многих странах Европы, в том числе в Австрии, Бельгии,

Франции, Венгрии Швеции. Мощность последних машин по сравнению с первыми (10 - 12 л.с.) достигала 75 л.с. Однако, машина Ньюкомена, прекрасна работающая в качестве водоподъемного устройства, не могла удовлетворить настоящую потребность в универсальном двигателе, т.е. оставалась всего лишь насосом.

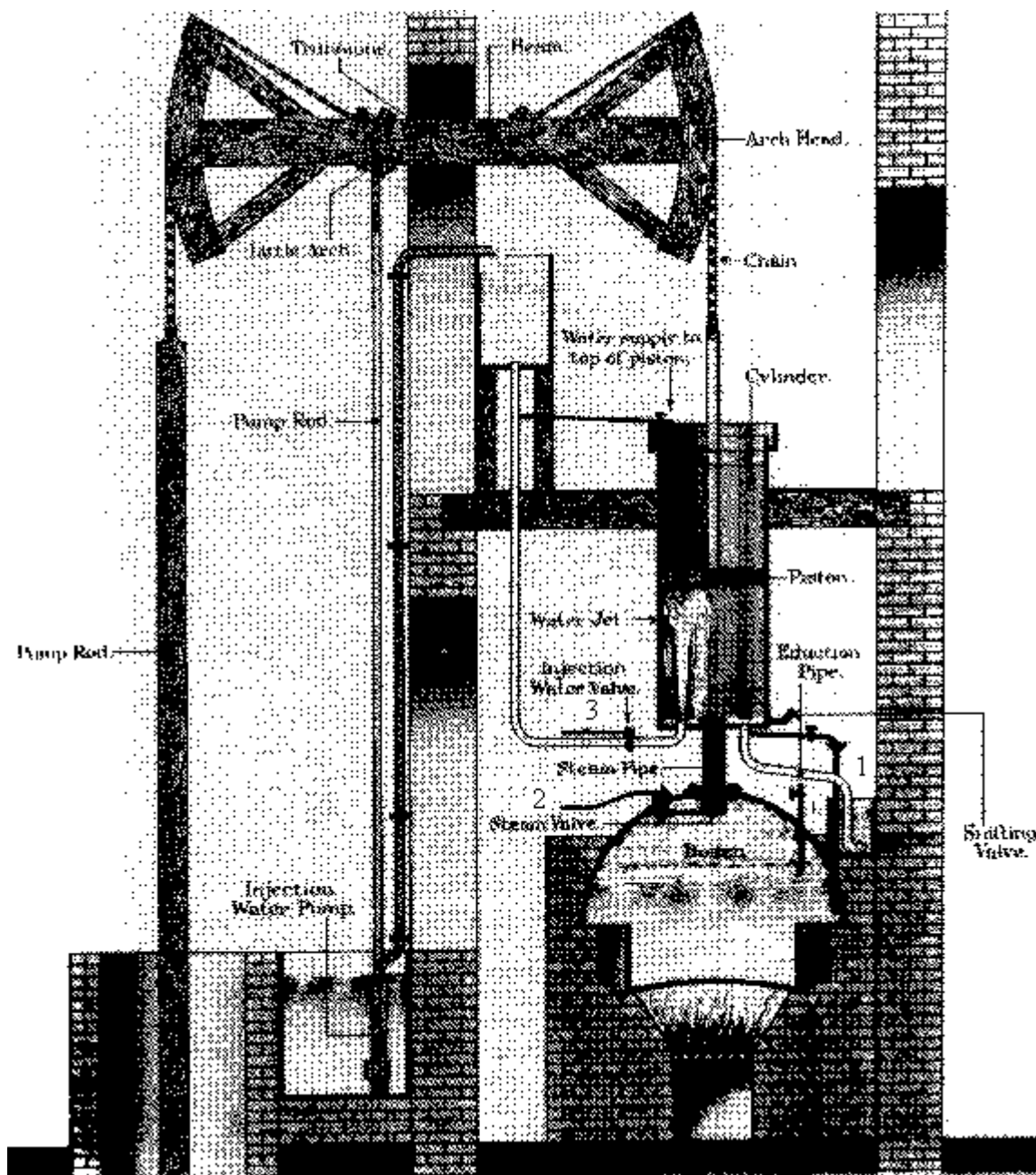
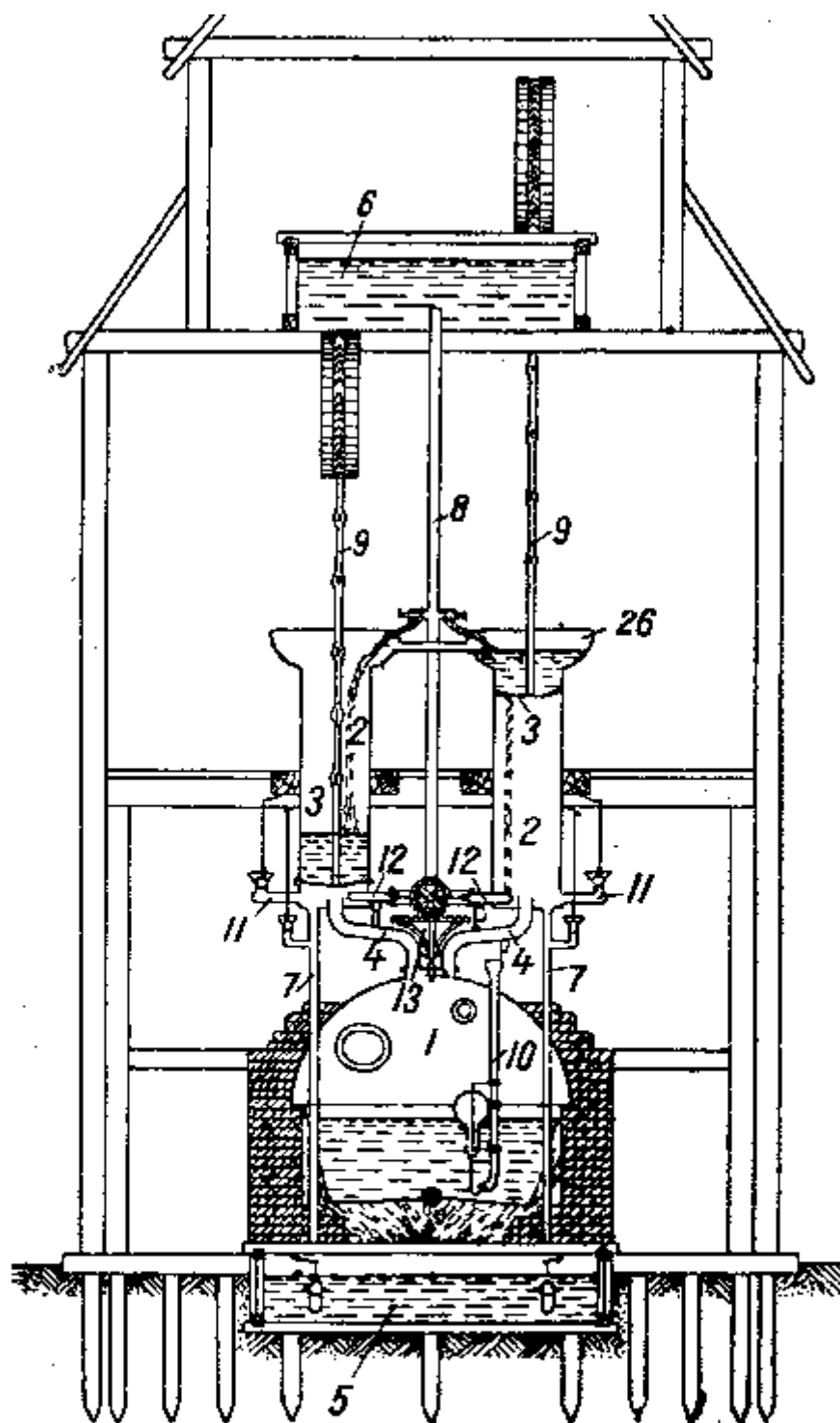


Рисунок 2 – Пароатмосферная машина Т.Ньюкомена, 1712 г.

Значительно более совершенную пароатмосферную машину построил в 1766 году барнаульский шихтмейстер Иван Иванович Ползунов (1729 - 1766). К этому времени Михаилом Васильевичем Ломоносовым (1711 - 1755) были разработаны основы теории о теплоте. В 1744 г. им был создан труд под названием «Размышления о причине теплоты и холода». (В этой и других последующих работах М. В. Ломоносов обосновал теорию превращения теплоты в механическую работу, противопоставив свое материалистическое учение идеалистическим учениям о «теплороде», как об особом невесомом веществе — носителе теплоты).



1- паровой котел; 2 - цилиндры машины; 3 - поршни цилиндров;  
 4 - паровпускные трубы; 5 - бассейн для сбора воды; 6 - напорный  
 водяной бак; 7 - трубы для спуска воды из цилиндров; 8 - труба для  
 подачи воды из напорного бака; 9 - тяги к балансирам; 10 - устрой-  
 ство для автоматического питания котла; 11 - воздушные трубы;  
 12 - трубы для подачи охлаждающей воды в цилиндры; 13 - водо-  
 распределительное устройство.

Рисунок 3 – Пароатмосферная машина И.И.Ползунова, 1766 г.

Труды М. В. Ломоносова в области теории теплоты нашли применение в практических работах И.И.Ползунова, создавшего в 1763—1764 гг. двухтактную пароатмосферную машину - универсальный тепловой двигатель для промышленных целей (только в 1784 г. Джеймс Уатт определяет свою машину, как универсальный двигатель для промышленности).

В проекте Ползунова не только был использован предшествующий опыт постройки подобных машин, но и содержались совершенно новые идеи, предвосхитившие развитие теплотехники на многие десятилетия вперед. Машина И. И. Ползунова, кроме своей универсальности (пригодности для любого промышленного применения в качестве механического двигателя), отличалась тем, что была машиной непрерывного действия, имела два паровых цилиндра, автоматически действующий парораспределительный и водораспределительный механизмы, в машине предусматривалось питание котла подогретой водой и автоматическое поддержание уровня воды в котле.

В 1766 г. машина И. И. Ползунова была построена и установлена на Колывано-Воскресенских заводах на Алтае для приведения в действие воздушных мехов. Изобретателю не удалось дожить до пуска в работу своей машины (И. И. Ползунов умер в 1766 г. за несколько дней до этого события). За короткий период своей работы (около 14 недель) машина полностью окупала первоначальные затраты на ее изготовление и принесла прибыль.

На рисунке 3 показан продольный разрез машины Ползунова. Машина имела два вертикальных паровых цилиндра диаметром 810 мм и развивала мощность около 40 л.с. Ход поршней составлял 2560 мм. Давление пара в котле составляло около 1 МПа. Пар из котла поступал в цилиндры по трубам 4. При подходе поршня к верхнему положению в цилиндр впрыскивалась вода по трубе 12 из напорного бака 6. Находящийся в цилиндре пар под действием холодной воды конденсировался, и в цилиндре создавался вакуум (разрежение). Так как цилиндры с верхней стороны были открыты, то под давлением атмосферы поршни опускались вниз и совершали полезную работу. Когда один поршень шел вниз, другой поднимался вверх; благодаря этому машина обеспечивала непрерывность действия приводимой ею воздухоудовки. Теплая вода из цилиндров поступала в бассейн 5, откуда направлялась для питания котла.

Это была первая в мире пароатмосферная машина, предназначенная для иных производственных целей, чем откачка воды, и воздействующая на рабочие устройства без посредства водяного колеса.

Мы не очень много знаем о жизни и взглядах Ползунова, не сохранилось не только воспоминаний современников, но даже и портрета гениального изобретателя, однако о благородстве его замыслов можно судить по его донесениям вышестоящим чиновникам: «...славу Отечеству достигнуть... облегчить труд, по нас грядущий».

#### **1.4. Паровая машина**

Честь создания паровой машины досталась скромному механику из университета в городе Глазго Джеймсу Уатту (1736 – 1819), который понял то, мимо чего проходили многие инженеры и ученые: 1) паровая рубашка вокруг цилиндра, поддерживающая стенки цилиндра в разогретом состоянии при температуре близкой к температуре поступающего в него пара; 2) конденсация пара в отдельном сосуде – конденсаторе; 3) цилиндр двойного действия; 4) механизм для автоматического парораспределения; 5) преобразование поступательного движения поршня во вращательное движение вала; 6) введение в механизм паровой машины регулятора частоты вращения.

Д.Уаттом было сделано то, что в конечном итоге превратило паровую машину в универсальный промышленный двигатель, способный без непосредственного участия человека превращать тепловую энергию топлива в механическую работу.

**Примечание.** Джеймс Уатт (James Watt, 1736 - 1819) – великий английский изобретатель, инженер, ученый. В 1769 году получил патент на паровую машину простого действия с конденсатором, в 1782 году получил патент на машину двойного действия. С 1784 г. – член Эдинбургского Королевского общества, с 1785 г. – член Лондонского королевского общества, с 1806 г.- доктор юридических наук, с 1816 г. – член Парижской академии наук.

Принцип действия паровой машины показан на рисунке 4. Работа поршня 1 посредством штока 2, ползуна 3, шатуна 4 и кривошипа 5 передается 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 применяется центробежный регулятор 9, автоматически изменяющий сечение прохода пара, поступающего в цилиндры (дроссельное регулирование), или изменяющий момент отсечки наполнения (количественное регулирование).

Судьба паровой машины - универсального промышленного двигателя была блистательной, она подняла на своих плечах весь XIX век – «век пара», проникла во все отрасли производства, на сухопутный, морской и речной транспорт, произвела настоящую революцию в промышленности и техники, границы и масштабы которой, трудно охарактеризовать в нескольких; словах. Сегодня мы не можем не быть благодарны ей за ее почти двух вековую службу человеку. За этот период мощность паровой машины выросла с 20 до 20000 л.с., коэффициент полезного действия увеличился с 2 до 20%, давление и температура пара достигли 20 МПа и 400<sup>0</sup>С соответственно, число оборотов превысило 1000 оборотов в минуту.

Д.Уатту выпало редкое счастье видеть повсеместное, триумфальное распространение своего главного изобретения жизни. На его памятнике в Вестминстерском аббатстве начертаны слова: «...применив к усовершенствованию паровой машины силу творческого гения, расширил производительность своей страны, увеличил власть человека над природой и занял выдающееся место среди наиболее прославившихся людей науки и истинных благодетелей человечества».

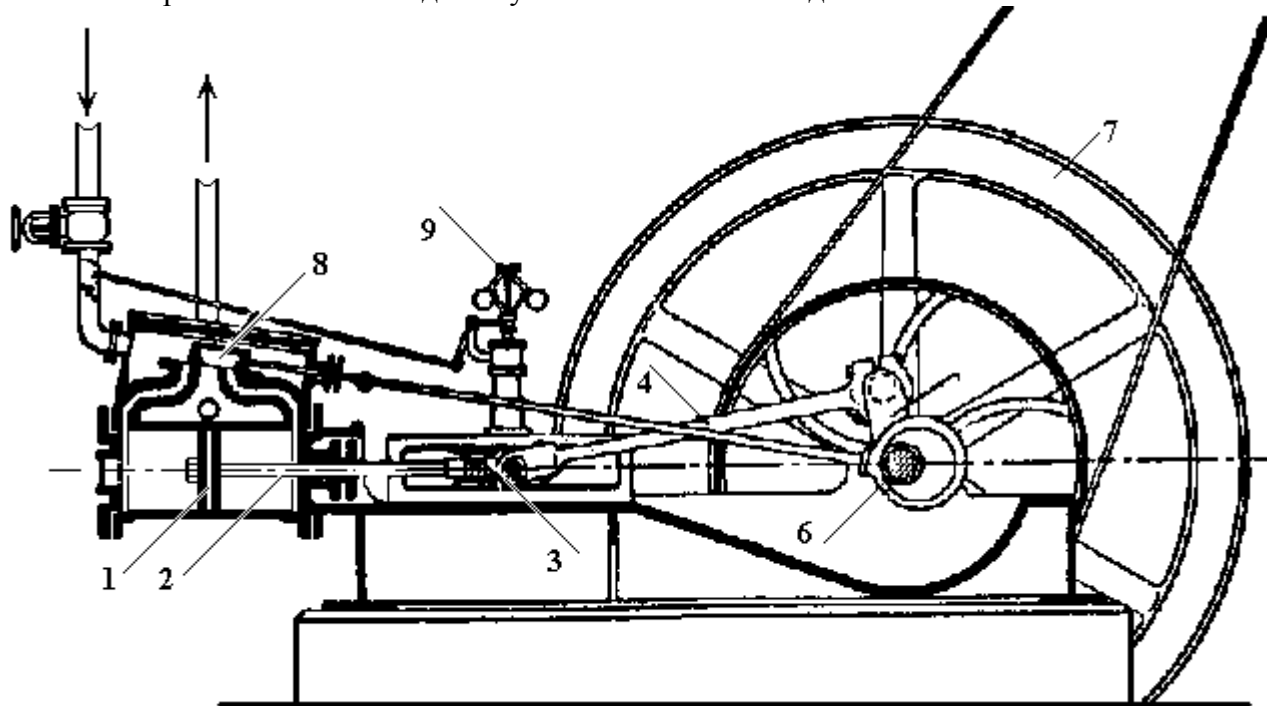


Рисунок 4 – Паровая машина Д.Уатта

Русский историк техники Николай Божерянов писал: «Без преувеличения можно сказать, что все завоевания англичан в Индии меньше обогатили и усилили их, нежели открытия Д.Уатта».

### 1.5 «Бунт» паровых машин.

Усилия инженеров, разрабатывавших все более совершенные паровые машины, были направлены, прежде всего, на увеличении их мощности. Простейший путь к достижению этой цели - расширить объем цилиндра, увеличив его диаметр и длину. Но увеличение диаметра приводило к большому просачиванию пара между поршнем и стенкой цилиндра. Тщательное уменьшение зазора приводило к резкому возрастанию трения, что приводило к падению мощности машины. К такому же результату приводило и удлинение поршня. Удлинение самого цилиндра требовало уд-



линить ход поршня, а значит утяжелить кривошипно-шатунный механизм, что влекло за собой необходимость делать маховик более массивным, ему предстояло протащить через «мертвую точку» и вернуть в исходное положение ставший более массивным поршень.

Борьба за увеличение мощности паровых машин ставила перед инженерами все более сложные задачи. Чтобы их решить, казалось выгодным увеличить расход пара, однако при этом возрастал диаметр паропровода, росли размеры и масса регулирующей заслонки. Чтобы при этом управлять машиной, приходилось все более увеличивать массы грузов в центробежных регуляторах и таким образом утяжелять удерживающие их рычаги и муфту. Одновременно инженеры делали машины все более быстроходными, что позволяло им уменьшать и облегчать маховики.

Идя этим путем, инженеры одновременно повышали точность изготовления и качество обработки движущихся частей машины и регулятора. Тщательная обработка стенок цилиндра и многочисленных подшипников снижала трение. Однако по мере увеличения мощности паровых машин и улучшения их деталей, все чаще возникали жалобы на их неустойчивую работу. Чтобы поддерживать число оборотов приходилось непрерывно вручную манипулировать заслонкой (и это при том, что на машине был установлен регулятор), и никакие усилия инженеров не позволяли отрегулировать машины так, чтобы они действовали так же устойчиво и послушно, как более старые и менее мощные машины, созданные при Д. Уатте.

Подозрение пало, прежде всего, на регулятор Уатта. Обращали на себя внимание два главных недостатка регулятора Уатта: а) регулятор начинает действовать, когда изменение скорости вращения уже произошло (в дальнейшем такой принцип регулирования получил название «принцип регулирования по отклонению»; б) регулятор поддерживает скорость вращения с некоторой погрешностью – на малых нагрузках несколько выше заданной, на больших – ниже (в дальнейшем такое свойство регуляторов получило название «неравномерность регулятора», а сами регуляторы стали называться статическими). Неравномерность можно было уменьшить, переместив опору рычага ближе к измерителю частоты вращения, однако при этом уменьшался момент, развиваемый грузами регулятора, что, в свою очередь, требовало увеличения их массы. И опять возникала парадоксальная ситуация: чем успешнее инженеры устраняли неравномерность регулятора, тем сложнее было его наладить, тем менее эффективно он действовал, и тем чаще машина выходила из заданного режима.

Десятки тысяч паровых машин «взбунтовались» против своих создателей и владельцев. Инженеры должны были признать свое бессилие. Никто не мог гарантировать, что новый экземпляр машины, изготовленный в точности по образцу предшествующей, будет работать надежно. Никто, приступая к наладке машины, не был уверен, что ему удастся ее укротить. В 1868 году только в Англии работало примерно 75000 паровых машин, которые были снабжены регуляторами Уатта. Причем большинство из них работало ненадежно. Машины, оборудованные регуляторами других типов (к тому времени появились другие регуляторы, свободные от недостатков, присущих регуляторам Уатта), отличались еще меньшей надежностью.

Возникла острая необходимость в создании теории регулирования машин, могущей, ответить на вопросы промышленной практики. Из многих сотен ученых и инженеров, работавших в XIX веке над вопросами теории регулирования машин, нужно выделить трех: 1) английского физика - профессора в Кембридже Джеймса Клерка Максвелла (1831 - 1879); 2) русского инженера - профессора Санкт-Петербургского технологического института Ивана Алексеевича Вышнеградского (1831 - 1895) и 3) словацкого инженера - профессора Цюрихского Политехникума Аурелия Стодолу (1859 - 1942), фундаментальные работы которых создали то, что сейчас называется **классической линеаризованной теорией автоматического регулирования (ТАР)**.