Девятнадцатый век не зря называли веком пара.С изобретением паровой машины произошел настоящий переворот в промышленности, энергетике, транспорте. Появилась возможность механизировать работы, ранее требовавшие слишком много человеческих рук. Железные дороги резко расширили возможности тр\анспортировки грузов по суше. В море вышли огромные суда, способные двигаться против ветра и гарантировавшие своевременность доставки товаров. Расширение объемов промышленного производства поставило перед энергетикой задачу всемерного повышения мощности двигателей. Однако первоначально вовсе не высокая мощность вызвала к жизни паровую турбину...

Гидравлическая турбина как устройство для преобразования потенциальной энергии воды в кинетическую энергию вращающегося вала известна с глубокой древности. У паровой турбины история столь же долгая, ведь одна из первых конструкций известна под наименованием "турбины Герона" и датируется первым столетием до нашей эры. Однако сразу заметим - вплоть до XIX века турбины, приводимые в движение паром, являлись скорее техническими курьезами, игрушками, чем реальными промышленно применимыми устройствами.

И только с началом индустриальной революции в Европе, после широкого практического внедрения паровой машины Д. Уатта, изобретатели стали присматриваться к паровой турбине, так сказать, "вплотную". Создание паровой турбины требовало глубокого знания физических свойств пара и законов его истечения. Изготовление ее стало возможным только при достаточно высоком уровне технологии работы с металлами, поскольку потребная точность изготовления отдельных частей и прочность элементов были существенно более высокими, чем в случае паровой машины.

В отличие от паровой машины, совершающей работу за счет использования потенциальной энергии пара и, в частности, его упругости, паровая турбина использует кинетическую энергию струи пара, преобразуя ее во вращательную энергию вала. Важнейшей особенностью водяного пара является высокая скорость истечения его из одной среды в другую даже при относительно небольшом перепаде давлений. Так, при давлении 5 кгс/м2 струя пара, вытекающая из сосуда в атмосферу, имеет скорость около 450 м/с. В 50-х годах прошлого века было установлено, что для эффективного использования кинетической энергии пара окружная скорость лопаток турбины на периферии должна быть не менее половины скорости обдувающей струи, следовательно, при радиусе лопаток турбины в 1 м необходимо поддерживать частоту вращения около 4300 об/мин. Техника первой половины XIX века не знала подшипников, способных длительно выдерживать такие скорости. Опираясь на собственный практический опыт, Д. Уатт считал столь высокие скорости движения элементов машины недостижимыми в принципе, и в ответ на предупреждение об угрозе, которую могла создать турбина изобретенной им паровой машине, ответил так: "О какой конкуренции может идти речь, если без помощи Бога нельзя заставить рабочие части двигаться со скоростью 1000 футов в секунду?"

Однако время шло, техника совершенствовалась, и час практического примения паровой турбины пробил. Впервые примитивные паровые турбины были использованы на лесопилках в восточной части США в 1883-1885 гг. для привода дисковых пил. Пар подводился через ось и далее, расширяясь, направлялся по трубам в радиальном направлении. Каждая из труб заканчивалась изогнутым наконечником. Таким образом, по конструкции описываемое устройство являлось весьма близким к турбине Герона, обладало крайне низким к.п.д., но более подходило для привода высокооборотных пил, нежели паровая машина с ее возвратно-поступательным движением поршня. К тому же для нагрева пара использовалось, по тогдашним понятиям, бросовое топливо - отходы лесопильного производства.

Впрочем, эти первые американские паровые турбины широкого распространения не получили. Их влияние на дальнейшую историю техники практически отсутствует. Чего нельзя сказать об изобретениях шведа французского происхождения де Лаваля, имя которого сегодня известно любому двигателисту.

Карл-Густав-Патрик де Лаваль

Предки де Лаваля были гугенотами, вынужденно эмигрировавшими в Швецию в конце XVI века из-за преследований на родине. Карл-Густав-Патрик ("основным" считалось все же имя Густав) родился в 1845 г. и получил превосходное образование, окончив технологический институт и университет в Упсале. В 1872 г. де Лаваль стал работать в качестве инженера по химической технологии и металлургии, но вскоре заинтересовался проблемой создания эффективного сепаратора для молока. В 1878 г. ему удалось разработать удачный вариант конструкции сепаратора, получивший широкое распространение; вырученные средства Густав использовал для развертывания работ по паровой турбине. Толчок к занятию новым устройством дал именно сепаратор, поскольку он нуждался в механическом приводе, способном обеспечить частоту вращения не менее 6000 об/мин.

Для того, чтобы избежать применения всякого рода мультипликаторов, де Лаваль предложил разместить барабан сепаратора на одном валу с простейшей турбиной реактивного типа. В 1883 г. на эту конструкцию был взят английский патент. Затем де Лаваль перешел к разработке одноступенчатой турбины активного типа, и уже в 1889 г. он получил патент на расширяющееся сопло (и сегодня термин "сопло Лаваля" является общеупотребительным), позволяющее уменьшить давление пара и повысить его скорость до сверхзвуковой. Вскоре после этого Густав сумел преодолеть и другие проблемы, возникавшие при изготовлении работоспособной активной турбины. Так, он предложил применить гибкий вал, диск равного сопротивления и выработал способ закрепления лопаток в диске.

На международной выставке в Чикаго, проходившей в 1893 г., была представлена небольшая турбина де Лаваля мощностью 5 л.с. с частотой вращения 30 000 об/мин! Огромная скорость вращения являлась важным техническим достижением, но одновременно она стала и ахиллесовой пятой такой турбины, поскольку для практического применения она предполагала включение в состав силовой установки понижающего редуктора. В ту пору редукторы изготавливали, главным образом, одноступенчатыми, поэтому нередко диаметр большой шестерни в несколько раз превосходил размеры самой турбины. Необходимость применения громоздких зубчатых понижающих передач помешала широкому внедрению турбин де Лаваля. Самая большая одноступенчатая турбина мощностью 500 л.с. имела расход пара на уровне 6...7 кг/л.с.·ч.

Интересной особенностью творчества Лаваля можно считать его "голый эмпиризм": он создавал вполне работоспособные конструкции, теорию которых позднее разрабатывали другие. Так, теорией гибкого вала впоследствии глубоко занимался чешский ученый А. Стодола, он же систематизировал основные вопросы расчета на прочность турбинных дисков равного сопротивления. Именно отсутствие хорошей теории не позволило де Лавалю добиться больших успехов, к тому же он был человеком увлекающимся и легко переключался с одной темы на другую. Пренебрегая финансовой стороной дела, этот талантливый экспериментатор, не успев реализовать очередное изобретение, быстро охладевал к нему, увлекшись новой идеей. Иного рода человеком был англичанин Чарльз Парсонс, сын лорда Росса.

Чарльз Алджернон Парсонс

Чарльз Парсонс родился в 1854 г. и получил классическое английское образование, закончив Кембриджский университет. Родом своей деятельности он избрал машиностроение и с 1976 г. стал работать на заводе Армстронга в Ньюкасле. Талант и изобретательность конструктора в сочетании с финансовыми возможностями родителей позволили Парсонсу быстро встать во главе собственного дела. Уже в 1883 г. он совладелец фирмы "Кларк, Чапмэн, Парсонс и Ко", а в 1889 г. - владелец собственного турбостроительного и динамостроительного завода в Гитоне.

Первую паровую многоступенчатую турбину реактивного типа Парсонс построил в 1884 г. Она предназначалась вовсе не для привода относительно маломощных сепараторов, а для работы совместно с электрическим генератором. Таким образом, уже с первого шага Парсонс правильно предугадал одну из наиболее перспективных областей применения паровых турбин, и в дальнейшем ему не пришлось разыскивать потребителей для своего изобретения. С целью уравновешивания осевого усилия пар подавался к середине вала турбины, а затем протекал к ее концам. Первая паровая турбина Парсонса имела мощность всего 6 л.с. и была подвергнута разнообразным испытаниям. Основные затруднения представляла разработка рациональной конструкции лопаток и способов их крепления в диске, а также обеспечение уплотнений. Уже в конструкции, датированной 1887 г., Парсонс применил лабиринтные уплотнения, что позволило перейти к турбинам с однонаправленным потоком пара. К 1889 г. число построенных турбин превысило 300 единиц, их мощность пока еще не достигла 100 л.с. при частоте вращения около 5000 об/мин. Такие турбины применялись преимущественно для привода электрических генераторов.

Взаимоотношения между компаньонами в "Кларк, Чапмэн, Парсонс и Ко" оказались далеко не безоблачными, и Парсонс вынужден был уйти, оставив бывшим коллегам и часть авторских прав, формально принадлежавших фирме. В связи с этим он надолго отказался от создания активных турбин (защищенных патентом) и перешел к разработке радиальных многоступенчатых турбин. Совершенствуя этот тип, конструктор сумел добиться впечатляющих результатов. Так, он уменьшил удельный расход пара с 44 до 12,7 кг/кВт·ч, но одновременно понял, что прежний аксиальный тип турбины был все же более перспективным. Начиная с 1894 г., восстановив права на патент, Парсонс вновь стал заниматься именно такими турбинами.

На своем заводе он опробовал самые различные материалы для лопаток турбин, но остановился на бронзе для насыщенного и умеренно перегретого пара, чистой меди для части высокого давления и никелевой бронзе для сильно перегретого пара. Кроме того, проводились глубокие исследования по созданию рациональной конструкции регулятора подачи пара. Для повышения точности Парсонс применил релейный принцип прерывистой подачи, позволяющий уменьшить трение. Параллельно вводились и другие усовершенствования, что в совокупности привело к уменьшению удельного расхода пара до 9,2 кг/кВт·ч у турбины мощностью 400 кВт, изготовленной в 1896 г.

Благодаря работам Чарльза Парсонса и его сотрудников Англия оказалась впереди всей планеты: если в других странах к паровым турбинам только присматривались, то в Соединенном Королевстве общая мощность построенных в том же 1896 г. турбин превысила 40 000 л.с. Но и на континенте передовые инженеры осознали важность новинки для целей энергетики. В 1899 г. по инициативе одного из них, Линдлея, занимавшего должность главного инженера Франкфурта, было решено применить на строящейся Эльберфельдской электростанции две турбины Парсонса мощностью по 1000 кВт. Немецкая гордость была задета. В первую очередь оказались недовольными промышленники, выпускавшие мощные паровые машины. Однако результаты испытаний турбин, опубликованные в 1900 г., свидетельствовали о неоспоримых преимуществах примененных установок по сравнению с традиционными "паровиками". Вскоре одна из лучших в то время электротехнических фирм "Броун-Бовери" в Бадене (неподалеку от Цюриха) приобрела лицензию на производство турбин Парсонса.

Далее предложения о покупке лицензий стали нарастать подобно снежному кому: помимо немцев интерес проявили итальянцы и американцы (в частности, компания "Вестингауз"). Если в 1903 г. наибольшая мощность турбины составляла 6500 кВт, то в 1909 г. появились агрегаты мощностью 10 000 кВт, в 1915 г. - 20 000 кВт, а в 1917 г. - 30 000 кВт! Турбины стали строить в Швейцарии, Франции, Австро-Венгрии. В компании "отцов-основателей" турбостроения появились имена француза О. Рато и американца Ч. Кертиса. Но Парсонс вошел в историю техники как звезда первой величины: ведь помимо чисто "турбинных" проблем он взвалил на себя (и успешно решил) еще и задачу внедрения нового вида двигателя на флоте.

Морские котлотурбинные установки

В конце XIX века сформировался новый класс военных кораблей - миноносцы (на Западе им соответствует термин "дистроер" - разрушитель), главным оружием которых стали прямоходные торпеды с мощным боевым зарядом, способным отправить на дно огромный броненосец. При небольшом водоизмещении единственной защитой для миноносца являлась высокая скорость, поскольку никакое бронирование не могло уберечь его от фатального конца в случае прямого попадания крупнокалиберного снаряда. Закономерным образом размеры миноносца росли, и на рубеже веков его водоизмещение достигло 350...500 т, а потребная мощность силовой установки - 5000...8000 л.с. Резко возросла масса механизмов и топлива на борту корабля, поэтому для сохранения высоких боевых качеств миноносца возникла настоятельная потребность в более мощном двигателе с лучшими удельными характеристиками. И такой двигатель появился в виде судовой турбины.

В 1894 г. Парсонс построил небольшое турбинное судно, в сущности катер водоизмещением всего 44,5 т, но мощность его силовой установки достигла 2000 л.с. 27 ноября "Турбиния" вышла на испытания и... разочаровала создателя. Ее скорость составила всего 19,7 узла, а конструктор ожидал получить не менее 30. Причина заключалась в так называемом проскальзывании гребного винта, позднее названном "кавитацией". Из-за чрезмерной частоты вращения винтов скорость воды на засасывающей стороне лопастей настолько возрастала, что давление понижалось до критического и вода вскипала при нормальной температуре, превращаясь в пар. В такой среде винт проскальзывал, терял упор, и его к.п.д. резко падал.

В течение года на "Турбинии" сменили 9 винтов, но ее скорость так и не достигла запланированного значения. Тогда Парсон радикально переделал судно, превратив его одновальную установку в трехвальную. На каждый вал работали последовательно соединенные по пару турбины высокого, среднего и низкого давления. Валы заканчивались тремя расположенными друг за другом гребными винтами. На первом же выходе обновленная "Турбиния" показала скорость 32,8 узла. К 1897 г., после ряда усовершенствований и повышения мощности котлотурбинной установки (КТУ) до 2400 л.с., она смогла разогнаться до 34,5 узлов! "Турбиния" являлась самым быстроходным судном в мире.

С целью демонстрации преимуществ судовой турбины Парсонс решился на неординарный шаг, граничивший с хулиганством. По его распоряжению перед началом морского парада, приуроченного ко дню 60-летия вступления на престол королевы Виктории, "Турбиния" несанкционированно промчалась перед строем английского флота, и ни один самый быстроходный британский миноносец не смог остановить наглеца. Резонанс оказался весьма значительным - о скандальном происшествии написали газеты, проснулось даже английское Адмиралтейство. Для начало оно заказало два "дистроера" с четырехвальной КТУ мощностью по 11 500 л.с., способной обеспечить кораблю контрактную скорость 31,5 узла. Следующим шагом стали крейсера "Аметист" и "Топаз", совершенно однотипные, за исключением силовых установок. При водоизмещении 3050 т максимальная мощность котлотурбинной установки "Аметиста" составила 13 000 л.с, обеспечив ему скорость 23,6 узла, в то время как котломашинная установка "Топаза" развивала максимальную мощность 9 600 л.с., а его скорость не превысила 21,8 узла. И, что очень важно, у "Аметиста" с увеличением скорости удельный расход топлива уменьшался, а у "Топаза" - имел минимум приблизительно при 14-узловой скорости.

По результатам испытаний англичане приняли радикальное решение: все вновь строящиеся надводные корабли основных классов оснащать КТУ.

Практически одновременно началось внедрение паровых турбин в судостроение. Первые два турбинных лайнера были построены в Англии для Канады, а в 1906 г. на линию Ливерпуль - Нью-Йорк вышел турбинный трансатлантик "Кармания". По условиям контракта в течение четырех месяцев он должен был плавать с опломбированными корпусами турбин, что исключало их вскрытие не только для ремонта, но и для осмотра. КТУ лайнера выдержала столь жесткое испытание, и в 1907 г. вошли в строй еще два турбинных судна водоизмещением по 38 тыс. т: "Лузитания" и "Мавритания". Последняя в ходе трансатлантического рейса продемонстрировала среднюю скорость, превысившую 26 узлов, и впоследствии в течение 22 лет удерживала "Голубую ленту Атлантики" - почетную награду самому быстроходному лайнеру океана.

В 1913 г. на Путиловском заводе в Петербурге был построен эскадренный миноносец "Новик", трехвальная КТУ которого суммарной мощностью 42 000 л.с. позволила кораблю установить мировой рекорд скорости 37,3 узла.

Вместе с тем, впечатляющие достижения не могли компенсировать невысокую экономичность паровой турбины на малых нагрузках, что существенно снижало ее привлекательность в качестве судового двигателя. Скорость, при которой турбинные суда получали преимущество перед судами с паровыми машинами, составляла 16…18 узлов. В связи с этим Ч. Парсонс предложил идею турбомашинной установки. Для малого хода и реверса использовалась паровая машина, а при скорости выше некоторой критической ее отключали, и пар подавался на турбины. Иным способом была устроена силовая установка печально известного "Титаника" и однотипного "Олимпика". На этих судах бортовые валы приводились во вращение паровыми машинами, а средний - турбиной, в которой использовался пар, уже отработавший в цилиндрах машин.

Триумф паротурбинной энергетики

В период между двумя великими войнами энергетическое турбостроение развивалось преимущественно в направлении применения пара высокого давления. Одна из первых таких турбин мощностью 1675 кВт была построена заводом "Броун-Бовери" для бельгийской электростанции. Давление пара было принято равным 50 кгс/см2, а его температура достигала 440…450 °С. Лабиринтное уплотнение получалось слишком сложным и ненадежным, поэтому конструкторы разместили первую ступень турбины высокого давления на весу, без подшипника.

Вскоре для электростанции в Маннгейме завод "Броун-Бовери" изготовил турбину мощностью 7000 кВт при давлении пара 160 кгс/см2 и температуре 430 °С. У турбины, построенной для электростанции в Лангербрюгге, параметры пара были выбраны еще более высокими: температура 450 °С, а его давление - 225 кгс/см2. В Соединенных Штатах компания "Дженерал-Электрик" предпочла не рисковать, ограничив давление 84 кгс/см2, но зато она стала энергично наращивать мощность единичной установки. Так, турбина, построенная для предприятия "Форда" (2-цилиндровая, 2-осевая), имела мощность 110 МВт при частоте вращения валов 1800 об/мин. В начале тридцатых годов в США вошли в строй огромные энергетические паротурбинные установки единичной мощностью 160 и даже 208 МВт.

Европейцы ограничились существенно меньшими значениями единичной мощности промышленных паровых турбин. Одной из наиболее "крутых" считалась установка в Витковицах, располагавшая двумя турбинами, одна из которых мощностью 30 МВт, а вторая - 18 МВт. Частота вращения этих агрегатов была выбрана равной 3000 об/мин, что обусловливалась принятой в Европе частотой переменного тока (50 Гц). Следует отметить, что в США паровые турбины имели, как правило, частоту вращения 1800 или 3600 об/мин в связи с "американской" частотой переменного тока, равной 60 Гц.

Удобство "сочленения" с электрическим генератором без применения каких-либо промежуточных передач оказалось исключительно важным достоинством паровой турбины. Кроме того, турбина легко переносила перегрузки, практически не замасливала пар (в отличие от паровой машины), легко регулировалась по частоте вращения. В сочетании с более высоким к.п.д. турбины, особенно при больших нагрузках, все эти достоинства относительно быстро привели к повсеместному "закату" эры паровой машины в энергетике и судостроении.