



А.Ф. Гонтаренко,
канд. техн. наук, доцент,
зав. отделом

ЗАО НТЦ ПБ

История развития котельной техники¹

Способность пара производить механическую работу давно известна человеку. Начиная с глубокой древности, появился целый ряд механизмов, основанных на использовании силы пара. Еще Герон Александрийский применил пар для движения аппарата специальной конструкции. Один из самых интересных трудов Герона — «Пневматика», в которой описано около 80 устройств и механизмов, действующих на принципах пневматики и гидравлики. Наиболее известное устройство — эолипил (в переводе с греческого: «шар бога ветров Эола»). Эолипил представлял собой наглухо запаянный котел с двумя трубками на крышке. На трубках устанавливали полый вращающийся шар, на поверхности которого находилось два Г-образных патрубка-сопла. В котел через отверстие заливали воду, отверстие закрывали пробкой и устанавливали котел над огнем. Вода вскипала, образовывался пар, который по трубкам поступал в шар и в Г-образные патрубки. При достаточном давлении струи пара, вырываясь из сопел, быстро вращали шар. Построенный современными учеными по чертежам Герона эолипил развивал до 3500 оборотов в минуту.

В XV в. знаменитый Леонардо да Винчи, интересовавшийся, кажется, всеми отраслями техники, спроектировал пушку, стрелявшую ядрами, вылетающими под давлением пара.

В технических сочинениях XVII в. «паровым машинам» начинают уделять все больше внимания. Итальянцы де-ля-Порта и Бранка, француз Соломон де-Ко, англичанин Ворчестер на протяжении этого столетия последовательно описали паровые приборы, предназначенные, главным образом, для подъема воды в фонтанах, водонасосных станциях и т.д.

Атмосферное давление как источник двигательной силы обращало на себя внимание многих ученых и изобретателей, особенно после опытов немецкого физика Отто фон Герике с так называемыми «магдебургскими полушариями», из которых был выкачан воздух.

Большое значение имело творчество французского физика Дени Папена (1647–1714) — изобретателя парового котла и предохранительного клапана. Он первым в 1690 г. правильно описал паромос-

ферный цикл, в котором использовалось атмосферное давление.

Впервые практическое использование энергии пара в технике внедрил англичанин Т. Севери (1650–1715), создав машину, предназначенную для откачки воды из шахт. Новое в машине Севери по сравнению с паровым котлом Папена заключалось в том, что в ней паровой котел был отделен от рабочего пространства. Но работа пара и его конденсация по-прежнему происходили в одном и том же сосуде.

Машина Севери обладала рядом серьезных недостатков: глубина всасывания в ней не превышала 10 м, т.е. высоты, соответствующей атмосферному давлению. Высота подачи воды в машине достигала 30 м, что определялось давлением пара, которое по условиям прочности котла не могло превышать 3 атм; опасность в работе из-за частых взрывов.

Но машины Севери все же довольно широко применялись на протяжении всего XVIII в. как в Англии, так и в других странах. В 1707 г. одна из них была приобретена Петром I и установлена в Петербурге в Летнем саду для приведения в действие фонтанов.

Следующий шаг вперед в деле совершенствования паровых машин сделал английский кузнец Т. Ньюкомен (1663–1729), который в 1711 г. для привода шахтных насосов предложил использовать свою конструкцию паромосферной машины. Ньюкомен не смог получить на свое изобретение патент, так как ранее выданный патент Севери был составлен таким образом, что закрепил за собой любые возможности использования водяного пара. Поэтому Т. Ньюкомен и его помощник Д. Коули вынуждены были войти в компанию с Т. Севери.

Мощность паромосферной машины Ньюкомена составляла 8 л.с. Она обеспечивала подъем воды с глубины 80 м. В насосе Ньюкомена котел был отделен от парового цилиндра, однако он выполнял двойную функцию, т.е. был в то же время и конденсатором. Много важных усовершенствований в паромосферную машину примерно в 1772 г. внес инженер Д. Смитон. Не меняя основного принципа ее действия, он рассчитал правильное соотношение размеров частей машины. Это способствовало лучшему ее изготовлению. Кроме того, Смитон сделал более целесообразной конструкцию отдельных частей машины.

Несмотря на довольно широкое практическое применение, машина Ньюкомена, как и вообще всякая паромосферная машина, не могла удовлетворить потребность промышленности в мощном универсальном двигателе. Она была громоздка, имела неравномерный ход, потребляла слишком много топлива.

¹ История энергетической техники / Л.Д. Белькинд, О.Н. Веселовский, И.Я. Конфедератов, Я.А. Шнейберг. — М.—Л.: Госэнергиздат, 1960. — 664 с.

О пареоатмосферных машинах не без основания говорили, что для их изготовления нужен железный рудник, а для обслуживания — угольная копь. Поэтому они служили лишь узкоспециальным целям (например, для подъема воды или соляного раствора) и совершенно не годились на роль универсального двигателя машинной индустрии.

Первый универсальный тепловой двигатель был изобретен в России в 60-х годах XVIII в. выдающимся русским теплотехником Иваном Ивановичем Ползуновым (1729—1766). Ползунов был знаком с описанием машин Севери и Ньюкомена, а также с работами М.В. Ломоносова по теплотехнике. В результате исследований И.И. Ползунов в 1763 г. разработал проект «огнедействующей машины для заводских нужд».

С большими трудностями, так как средств для сооружения машины было отпущено недостаточно, Ползунов с помощью нескольких учеников приступил в 1764 г. к ее созданию, и в 1765 г. она была построена. Следует отметить, что эта машина существенно отличалась от первого проекта Ползунова. В ней сконструирован привод для нескольких печей и обеспечен малый расход топлива. Ползунову не удалось дожить до пуска машины, в мае 1766 г. он умер от скоротечной чахотки. Пуск машины был осуществлен лишь в августе 1766 г. Она проработала около двух месяцев, но весьма эффективно: за 43 дня работы прибыль составила около 12 тыс. руб. Но в ноябре 1766 г. котел дал течь. Машину остановили, а через несколько лет она была сломана и забыта.

Универсальный паровой двигатель, пригодный для практической эксплуатации, был изобретен (и практически внедрен) английским теплотехником Дж. Уаттом (1736—1819). Работу над паровыми машинами Уатт начал с 1764 г., когда ему поручили исправить модель пареоатмосферной машины Ньюкомена. Обратив внимание на нерациональный расход топлива в ней, Уатт пришел к выводу, что эффективность работы паровой машины зависит от выполнения следующих двух условий, которые в машине Ньюкомена выполнить было невозможно:

1. Целесообразно максимально охлаждать цилиндр для полной конденсации пара и получения более глубокого разрежения под поршнем.

2. В целях недопущения потерь пара его необходимо из котла впускать в горячий (неохлаждаемый) цилиндр.

Для выполнения этих условий Уатт предложил конденсировать пар в отдельном резервуаре (конденсаторе), имеющем сообщение с цилиндром. В поисках средств для постройки своего двигателя Уатт вел переговоры о переезде в Россию, где ему предлагалось жалование в 1000 фунтов стерлингов за «занятие, сообразное с его вкусом и познаниями». Однако заключенный с промышленником Болтоном, владельцем машиностроительного предпри-

ятия в Сохо, близ Бирмингема, контракт помешал отъезду Уатта в Россию.

Завод в Сохо располагал первоклассным по тем временам оборудованием и квалифицированными кадрами. Поэтому Уатт принял предложение Болтона, и с начала 70-х годов до своей смерти он оставался главным механиком завода.

Более экономичная машина Уатта нашла широкое применение в рудниках и шахтах. Однако и она не решала основной проблемы пареоатмосферных машин — она не была пригодна для роли универсального двигателя. Рабочие органы пареоатмосферных машин совершали прямолинейные и качательные движения, тогда как для широкого универсального применения необходима была машина, снабженная валом с насаженным на него непрерывно вращающимся колесом, от которого можно передать работу машинам-орудиям (ткацкий станок) посредством ременной передачи. С 1778 г. Уатт начинает работать над изобретением машин с непрерывным вращательным движением. В результате была создана машина двойного действия, которая и стала универсальным тепловым двигателем. Патент на эту машину он получил в 1784 г. Принцип действия машины заключался в том, что пар из котла поступал в цилиндр через золотник, который позволял подавать пар то с одной стороны поршня, то с другой, создавая тем самым необходимое давление на поршень. В середине 80-х годов XVIII в. конструкция паровой машины была окончательно доработана, и она стала универсальным тепловым двигателем, нашедшим широкое применение почти во всех отраслях хозяйства многих стран.

Исходным типом современных котлов был простой цилиндрический котел, выполненный в виде горизонтального барабана с топкой под ним. Стенки барабана служили одновременно и поверхностями нагрева. У котла такой конструкции была относительно небольшая поверхность нагрева, представляющая собой нижнюю наружную часть барабана, заполненного на 3/4 водой и обогреваемого продуктами горения топлива.

Данный котел имел ряд крупных недостатков: низкий удельный паросъем, равный примерно 1 кг пара с 1 м² поверхности нагрева; высокий удельный расход металла — 1 кг металла на 1 кг пара; большие габариты; низкий коэффициент полезного действия (кпд); большую силу взрыва в связи со значительным водяным объемом (значительное количество перегретой относительно 100 °С воды, которая мгновенно вскипала при разгерметизации котла).

Однако необходимо отметить и его достоинства: не требовалась тщательная предварительная очистка воды, подаваемой в котел; простота устройства и обслуживания; большая тепловая аккумулирующая способность.

Эти достоинства способствовали тому, что котлы такой конструкции длительное время были основ-

ными производителями пара для промышленных нужд.

Создание универсального двигателя стало поворотным пунктом развития теплоэнергетики. Была решена основная задача — придание паровой насосной установке возможности отдавать потребителю работу непрерывно, в любой форме движения, с любой степенью равномерности. К концу XVIII в. завершилась работа по совершенствованию передаточных механизмов, способных придать паровому двигателю универсальность для технического применения.

Вместе с тем возникли новые требования, предъявляемые к двигателю со стороны развивающейся промышленности и транспорта — необходимость повышения двух основных показателей: единичной мощности и КПД.

Если рост единичной мощности паросиловых установок требовал повышения паропроизводительности котлов, то увеличение КПД неизбежно приводило к конструированию более прочных котлов, так как роста КПД нельзя достичь без повышения давления пара.

Один из крупнейших инженеров середины XIX в., изобретатель парового молота Дж. Несмит писал: «В паросиловых установках стали применять такое высокое давление, которое заставило бы инженеров старой школы упасть в обморок от страха, но так как экономический результат этого повышения давления пара очень быстро обнаружился в совершенно недвусмысленной форме фунтов, шиллингов, пенсов, паровые котлы высокого давления получили почти всеобщее распространение».

Переход на более высокое давление входил в противоречие с требованием повышения паропроизводительности. Прочность котла обеспечивалась его шаровой или цилиндрической формой, что ограничивало поверхность нагрева котла. Инженерное решение этой проблемы состояло в сохранении цилиндра как прочного элемента котла, с учетом того, что при равной толщине стенки прочнее тот цилиндр, у которого меньший диаметр. Потребность в росте давления приводила к уменьшению диаметра цилиндра и превращению его в трубу. Для увеличения паропроизводительности возрастала длина трубы, обеспечивая необходимую поверхность нагрева.

Единый цилиндрический барабан котла дробился на группы труб. Конструктивное решение этого дробления реализовывалось по двум направлениям: если внутри трубы пропускались топочные газы, то дробился газовый тракт котла (газотрубные котлы);

если внутри трубы циркулировала испаряющаяся вода, то дробилось водяное пространство в котле (водотрубные котлы).

По месту начального распространения котлы с одной жаровой трубой и котлы с двумя жаровыми

трубами получили названия, соответственно корнваллийские и ланкаширские.

В дальнейшем происходило дробление газового тракта на трубы меньшего диаметра, которые получили название дымогарные. Локомотивный котел с дымогарными трубами дает достаточно развитую поверхность нагрева в относительно небольшом объеме котла. Для судовых установок применялся котел с трубками, направленными к фронту. Этот котел получил название оборотный или шотландский. Наибольшее применение дымогарных труб нашло в паровозных котлах.

Недостатком конструкции газотрубных котлов являлось то, что барабан котла большого диаметра был нагружен высоким внутренним давлением. Это ограничило применение их для работы под давлением выше 1,5 МПа (15 кг/см²). С другой стороны, поскольку в водном объеме газотрубного котла невозможно расположить большое количество жаровых и дымогарных труб, максимальная единичная мощность таких аппаратов была крайне ограниченной. Данные обстоятельства в основном и вызвали прекращение производства жаротрубных котлов для нужд промышленности и энергетики.

Дробление водяного пространства в виде «двоек», «шестерок», «девяток» было распространено достаточно широко в котельных установках XIX в. В зависимости от расположения нижних труб котлы назывались «с кипятильниками» или «с подогревателями».

Дальнейшее применение труб малого диаметра (около 100 мм) позволило усовершенствовать разбиение водного пространства котла, тем самым улучшая условия теплообмена. Но при этом очень важной стала задача обеспечения надежной циркуляции воды в трубках. В связи с этим перешли к конструкции котла по схеме с двумя коллекторами.

К концу XIX в. были разработаны конструкции котлов, позволяющих перейти к паропроизводительности в сотни тонн пара в час. Эта возможность заложена в водотрубных котлах, представляющих собой комбинацию стальных труб небольшого диаметра. Малый диаметр позволяет при толщине труб 3–4 мм выдерживать высокое давление. Большие поверхности нагрева достигались увеличением суммарной длины труб, входящих в конструкцию котла.

Развитие конструкции водотрубных паровых котлов шло по двум направлениям. По классификации того времени они делились на «горизонтальные» и «вертикальные». Отличительная особенность конструкции «горизонтальных» котлов — наличие особых коллекторов, в которые ввальцовывались трубы. В «вертикальных» котлах трубы ввальцовывались непосредственно в барабаны. Если возможность увеличения поверхностей нагрева за счет удлинения труб, увеличения числа коллекторов и барабанов успешно реализовывалась в котлах обеих конструкций, то переход к высоким и сверхвы-

соким параметрам давления достигался в котлах, в которых были предусмотрены отказ от коллекторов (камер) с плоскими стенками и непосредственная вальцовка (а затем вварка) труб в барабан.

С середины XIX в. некоторые заводы стали выпускать горизонтальные камерные водотрубные котлы. Однако опыт эксплуатации выявил ряд конструктивных недостатков, связанных прежде всего с наличием плоских стенок, плохо выдерживавших высокое давление и требовавших для укрепления множества связей, которые затрудняли очистку котла от накипи и вызывали тепловые напряжения.

Типичным представителем двухкамерного горизонтального водотрубного котла может служить выпускаемый в Германии котел Штейнмюллера с ручной топкой для угля, характерным расположением пароперегревателя, допускавшим регулирование перегрева заслонкой, расположением поперечных газоходов и выводом топочных газов в подземный бор. С недостатками, присущими камерным горизонтальным водотрубным котлам, можно было мириться при значениях рабочего избыточного давления 3–8 кг/см².

С увеличением давления пара потребовалось новое конструктивное решение, заключающееся в разделении камер на секции, благодаря чему допускалось более свободное тепловое расширение конструкции котла и осуществлялась возможность выдерживать большее давление. Одним из первых высококачественных секционных котлов стал котел фирмы «Бабкок—Вилькокс».

Выдающийся российский инженер В.Н. Шухов в 1896 г. запатентовал котел, получивший преимущественное распространение в России, каждая отдельная секция которого представляла собой стандартный пучок из труб (19–21), которые вальцовывались в короткие барабаны с легко снимающимися крышками. В результате осуществлялся свободный доступ ко всем трубкам пучка одновременно.

Разборный котел Шухова был транспортабельным, отличался малой металлоемкостью и невысокой стоимостью. В патентной заявке на свой котел Шухов писал: «В случае надобности обмуровка таких котлов заменяется особою одеждою, состоящей из циркуляционных труб». Таким образом, Шуховым впервые был предложен топочный экран, получивший широкое распространение в котлах современной конструкции.

В качестве одного из примеров стационарных вертикальных котлов может служить четырехбарабанный водотрубный котел, предложенный в 1894 г. американским инженером Стирлингом.

Разнообразие компоновок котлов, позволяющее применять от трех до шести барабанов, а также выделение последнего (по ходу газов) пучка в качестве экономайзера, удобное расположение пароперегревателя между первым и вторым пучками (по ходу

газов) сделали котлы такого типа весьма распространенными, а некоторые конструктивные элементы сохранились в современном котлостроении. Одновременно с котлами Стирлинга в Германии получили широкое распространение вертикальный водотрубный котел Гарбе, отличавшийся прямыми трубками и допускавший при многобарабанном исполнении те же возможности в компоновке, что и котлы Стирлинга. Перегрев пара в котлах Гарбе регулировали поворачивающимися заслонками.

В первой половине XX в. произошли коренные изменения конструктивных форм котлоагрегатов. Эти изменения были обусловлены дальнейшим стремлением инженеров и ученых решить две основные задачи котлостроения, которые возникли с момента появления паровых котлов и остаются актуальными в наши дни: повышение давления и паропроизводительности котлов. Решение этой проблемы на данном этапе связано с интенсификацией физических факторов, определяющих напряженность работы котла в целом. К ним относятся температура и скорость газов, воды, пароводяной смеси.

Основные тенденции развития котлостроения в первой половине XX в.

1. Увеличение топочных объемов, переход от слоевого сжигания топлива к факельному в топках-камерах. В увеличении топочных объемов отражено стремление к интенсификации процессов горения, повышению его температуры и полноты сгорания вне зависимости от качества топлива. Рост топочных объемов вызвал переход к факельному сжиганию топлива в камерных топках. Это обусловлено тем, что при увеличении геометрических размеров котла механизация слоевого сжигания топлива становилась трудной, а ручное обслуживание не обеспечивало питание топок топливом. Переход к факельному сжиганию твердого (предварительно размолотого) и жидкого (предварительно распыленного) топлива привело к значительному снижению химической и механической неполноты сгорания топлива, что, в свою очередь, повышало КПД котла.

2. Введение широко развитых радиационных поверхностей нагрева — топочных экранов. Повышение температуры горения потребовало защиты топочных стен и сводов. Для этой цели стали применять топочные экраны, представляющие собой трубы, воспринимающие радиационное тепло от сжигания топлива. В экранных трубах происходит процесс парообразования. Применение экранных радиационных поверхностей нагрева повышало удельное тепловосприятие котла. В котлах сильнее стало проявляться перераспределение между конвективными поверхностями нагрева (тепловосприятие от движущихся газообразных продуктов сгорания топлива) и радиационными поверхностями нагрева. Это перераспределение, с учетом повышения скорости газов, позволило уве-

личить удельный паросъем с квадратного метра с десятков до сотен килограммов в час.

3. Увеличение «хвостовых» поверхностей нагрева: водяных подогревателей (экономайзеров) и воздухоподогревателей. Водяной подогреватель (экономайзер) получил большое развитие на последних ступенях регенеративного подогрева и стал работать под котельным давлением, приняв на себя функцию предварительного подогрева воды почти до парообразования. Развитие конструкций экономайзеров представляло собой важный шаг на пути повышения КПД парового котла. В первой половине XX в. в области повышения КПД были достигнуты большие успехи: в отдельных котельных установках он возрос с 50 до 90 %. Применение воздухоподогревателей интенсифицировало процесс сгорания топлива путем подачи в топку воздуха, предварительно нагретого до высокой температуры.

4. Сокращение числа барабанов. В 30-е годы преобладали конструкции котлов с двумя, а затем — с одним барабаном. Уменьшение числа барабанов обусловлено тем, что с ростом котельного давления барабан стал дорогой частью котла. Кроме того, изменилась роль барабана как водяного аккумулятора, т.е. емкости, служащей как для выравнивания колебаний потребления пара, так и для работы при многократной циркуляции пароводяной смеси по трубкам котельных поверхностей нагрева.

5. Введение принудительной циркуляции. Стремление к снижению металлоемкости котлов привело к применению котельных труб меньшего диаметра (40 мм вместо 100 мм). Однако эта конструктивная тенденция в сочетании с увеличением суммарной длины котельных труб и контура усложняла задачу обеспечения естественной циркуляции за счет разности плотности воды нисходящих и пароводяной смеси восходящих циркуляционных потоков. В свя-

зи с этим встала задача применения принудительной циркуляции, осуществляемой специальными циркуляционными насосами. Были разработаны предложенные Ла-Монтом конструкции котлов с принудительной циркуляцией и одним барабаном в качестве выравнивающей емкости.

6. Освоение конструкций прямоточных безбаранных котлов с однократной принудительной циркуляцией. Стали конструировать безбаранные котлы с принудительной однократной циркуляцией — прямоточные котлы. Такая конструкция давно предлагалась многими изобретателями, но переход от принципиальных схем до разработки рациональных и надежных конструкций был осуществлен в 20–30 гг. XX в. Появление прямоточных котлов связано со стремлением упростить конструкцию барабанных котлов, отказаться от громоздкого дорогостоящего барабана. Сначала такие конструкции котлов возникли в Германии. Распространение прямоточных котлов в СССР связано с именем Л.К. Рамзина, под руководством которого был проведен большой объем исследовательских и конструкторских работ по созданию прямоточного котла докритического давления, а также создан котел сверхкритического давления.

Переход к прямоточным котлам, не обладающим аккумулярующей способностью, потребовал автоматизации управления котельными установками, теплового контроля за их работой, глубокой очистки питательной воды.

Таким образом, вертикальные водотрубные котлы получили широкое распространение в промышленности и энергетике. Котлы этой конструкции, в отличие от газотрубных, обладают практически неограниченными возможностями увеличения паропроизводительности.

gontarenko@safety.ru

Внимание!

Реклама



В издательстве ЗАО НТЦ ПБ вышел **Федеральный закон О ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ** (в редакции, вступившей в силу с 15.03.2013 г.)

Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». — 14-е изд., с изм. — М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. — 52 с.

Эту книгу и другие нормативные документы можно приобрести по адресу:

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 21, а также заказать в отделе распространения по тел./факсам: **(495) 620-4753** (многоканальный), **620-4747, 620-4746**. E-mail: ornd@safety.ru.