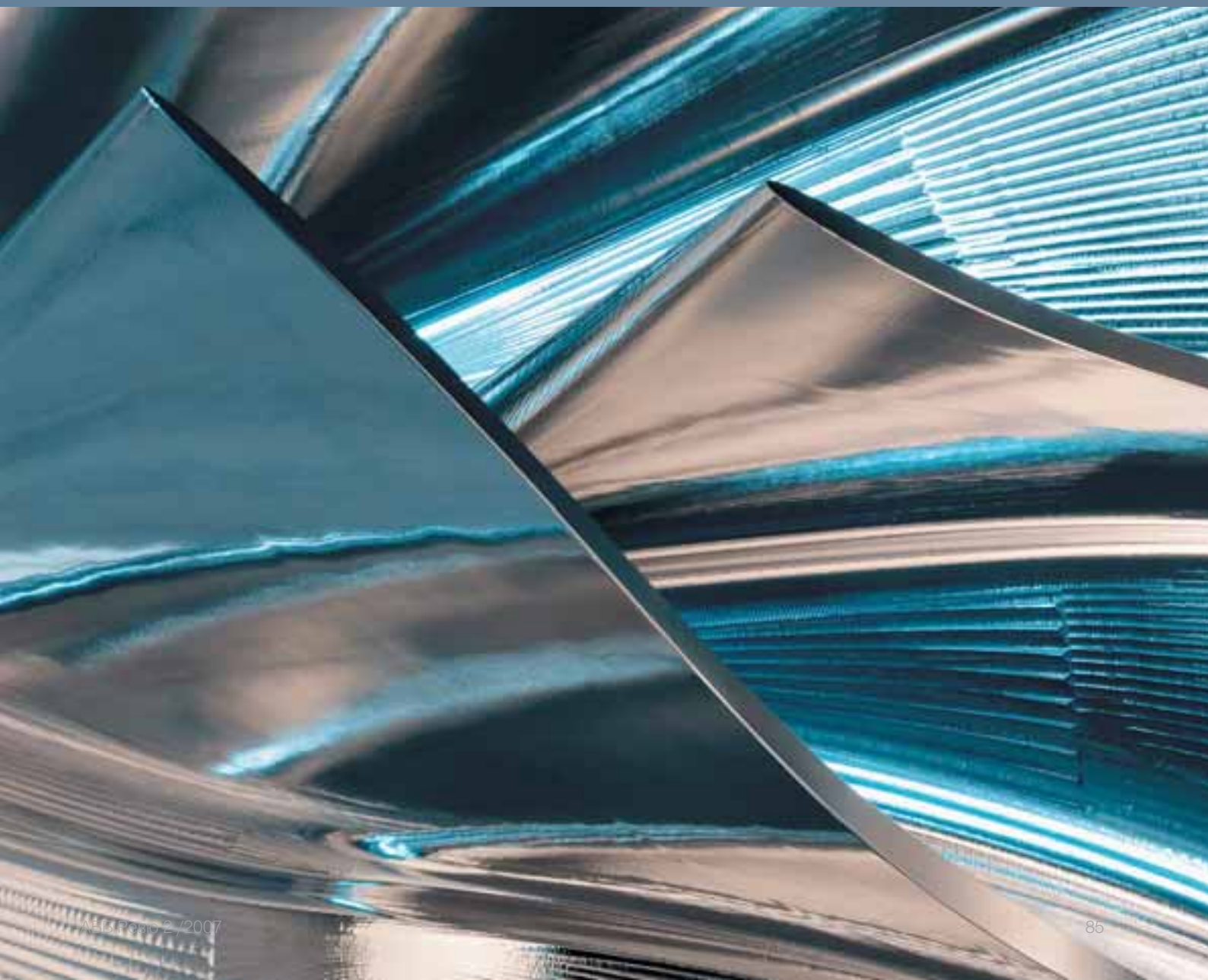


Турбонагнетатели компании АББ: этапы большого пути

Малькольм Саммерс

Во всех уголках нашей планеты – на океанских просторах и высоко в Гималаях, от ледяных просторов Арктики до раскалённых пустынь центральной Австралии – исправно трудятся турбонагнетатели, изготовленные компанией АББ. Из идеи более чем столетней давности получился продукт высоких технологий, сохраняющий свою эффективность и надёжность даже в самых невероятных условиях.



Всегда в первых рядах

Подобно другим новаторским идеям до и после, идея турбоагнетателя на выхлопных газах, став известной миру в 1905 г., на первых порах особого интереса не вызвала. В патенте, датированном этим годом, швейцарский инженер Альфред Бюхи (рис. 1) описал «составной двигатель с высокой степенью наддува», состоящий из дизеля и отдельно установленных на общем валу осевого компрессора и осевой турбины. Пока Бюхи продолжал развивать свою идею, другие изобретатели, работая с механическими нагнетателями, тоже добивались определённых успехов. Были у Бюхи и конкуренты, мысль которых шла примерно в том же направлении. И уже к 1920 г. небольшие турбоагнетатели на выхлопных газах использовались во французской и американской авиации. Что же касается мощных нагнетателей для тяжёлых условий работы, то применение их тогда было ещё экономически нецелесообразно.

1 Альфред Бюхи: полученный им в 1905 г. патент считается началом истории турбоагнетателей, работающих от выхлопных газов.



2 Первый в мире турбоагнетатель для дизельного двигателя большой мощности (1924 г.).



Наконец-то прогресс!

Всё изменилось в 1923 г., когда в Германии был опубликован отчёт об испытаниях низконапорного наддува четырёхтактных дизелей. Компания Браун Бовери, одна из двух основателей АББ, решила использовать своё богатейшее «ноу-хау» при изготовлении турбин и компрессоров для разрабатываемых турбоагнетателей.

В период между 1945 и 1960 гг. тоннаж торгового флота в мире удвоился и это означало окончательное торжество турбоагнетателей.

В том же 1923 г. швейцарская компания Swiss Locomotive and Machine Works (SLM) произвела испытания двухтактного дизеля в поисках путей повышения его мощности и экономичности. Здесь-то компания Браун Бовери и предложила использовать турбоагнетатель на выхлопных газах для подачи воздуха в цилиндры, после чего компания SLM заказала у Браун Бовери такой нагнетатель. В июне 1924 г. первый в мире мощный турбоагнетатель VT402, работающий от выхлопных газов, вышел с завода компании Браун Бовери (рис. 2).

Большой интерес к новинке проявили на флоте. Годом раньше, в 1923 г., на судовой верфи Vulkan в Германии были заложены два больших пассажирских судна, на каждом из которых устанавливалось по два 4-тактных 10-цилиндровых двигателя MAN с турбоагнетателями, сконструированными и изготовленными под общим руководством лично Бюхи. Спущенные на воду в 1926 г. эти два судна были первыми в истории флота, имевшими турбонаддув двигателей.

«Синдикат Бюхи»

В 1925 г. Бюхи получил на своё имя новый патент и вновь обрёл мировую известность. Раскрытие преимуществ пульсирующего режима работы низконапорных турбоагнетателей явилось долгожданным прорывом в этой области. Годом позже была образована новая компания, получившая в народе название «Синдикат Бюхи»¹⁾. Бюхи взял на себя решение инженерных вопросов и отношения с заказчиками, компании Браун Бовери предстояло выпускать турбоагнетатели, а компании SLM – поставлять двигатели для испытаний на них нагнетателей.

В 1927 г. компании SLM для второго опытного дизеля был поставлен более совершенный и мощный турбоагнетатель с обозначением VT592. Результат получился впечатляющий, и были заключены лицензионные соглашения между синдикатом и ведущими производителями двигателей. Начались первые пробные поездки тепловоза (рис. 3), дизель которого имел новый нагнетатель. Кроме того, турбоагнетатели хорошо зарекомендовали себя в качестве средства повышения экономичности стационарных двигательных установок, например на электростанциях.

¹⁾ Этот синдикат распался в 1941 г.

3 Этот 8-цилиндровый тепловозный двигатель компании ALCO мощностью 900 л.с. является типичным примером использования наддува с помощью турбоагнетателя от компании Браун Бовери (конец 1930-х гг., нагнетатель типа VTx 350).



В 1932 г. впервые были сформулированы технические требования уже к стандартизованному ряду турбоагнетателей из 9 типоразмеров, определяемых диаметром компрессора – от 110 до 750 мм. Широкое использование модулей, а также большого количества стандартных деталей позволило изготавливать агнетатели для самых различных двигателей. Конструкция агнетателей предусматривала внешнюю установку шарикоподшипников, что значительно упрощало работы по техническому обслуживанию и ремонту.

Запуск в производство агнетателей серии VTR...0

Начиная с 1940 г., компания Браун Бовери вела разработку нового семейства турбоагнетателей под обозначением VTR, имевших открытый центробежный турбокомпрессор (отсюда и R в обозначении), лёгкий ротор, устанавливаемые извне роликовые подшипники и автоматическую подачу смазки. Стандартизация отдельных компонентов агнетателей позволила развернуть их широкомасштабное производство. Выход в 1945 г. турбоагнетателей серии VTR.0 на рынок стал заметной вехой в истории турбоагнетателя компании BBC/ABB. Имея эффективность 75 % и отношение давлений 2, этот агнетатель был только началом новой эры (рис. 4).

Триумфальное шествие турбоагнетателей

В период между 1945 и 1960 гг. тоннаж торгового флота в мире удвоился и это означало окончательное торжество турбоагнетателей. Форсирование давления наддува в этот период шло медленно, но верно. Первые агнетатели серии VTR могли оснащаться компрессором как низкого, так и высокого давления, но во втором случае имелось ограничение по объёмному расходу воздуха.

В последующих разработках компрессоров это удастся преодолеть и отношение давлений при полной нагрузке будет уверенно доведено до 3.

В 1925 г. Бюхи получил на своё имя новый патент и вновь обрёл мировую известность. Раскрытие преимуществ пульсирующего режима работы низконапорных турбоагнетателей явилось долгожданным прорывом в этой области.

Последовательное «оттачивание» технологии турбоагнетателя к началу 1950-х гг. подготовило почву для следующего новшества. В октябре 1952 г. вступил в строй танкер «Dorthe Maersk» водоизмещением 18 000 тонн, построенный на датской судовой верфи А. Р. Moller. Это было первое судно, имеющее двухтактный 6-цилиндровый дизельный двигатель B&W с турбоагнетателем. Два турбоагнетателя VTR630, расположенные сбоку двигателя, позволили поднять мощность на его валу с 5530 до 8000 л.с. Танкер Dorthe Maersk стал первой вехой в применении турбоагнетателя двухтактных судовых двигателей.

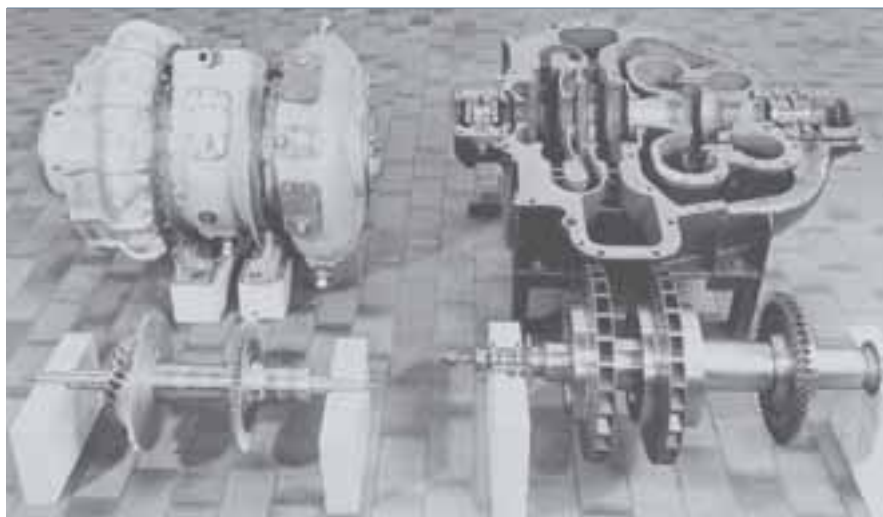
В этот период создатели турбоагнетателей не раз тесно сотрудничали с двигателестроителями, лишняя раз подтверждая всю важность такого взаимодействия. Важно было разъяснить преимущества новой технологии турбоагнетателя, как наилучшим образом использовать в импульсном

режиме энергию выхлопа и как обеспечить это конструкцией выхлопных труб.

Начиная с 1955 г., компания Браун Бовери заключила целый ряд лицензионных соглашений, одно из которых особенно примечательно. В 1958 г. японской компании Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI) была выдана лицензия на производство турбоагнетателей разработки компании BBC/ABB. Компания IHI, в то время выпускавшая двигатели по лицензии компании Sulzer, расширяла своё присутствие в азиатском регионе и тем самым закрепляла там доминирующее положение турбоагнетателей от АББ.

Судоостроение достигло невиданного размаха, цены на сырую нефть были низкими и с затратами на топливо не считались. Производство дизельных двигателей процветало, а агнетатель VTR.0 с общей эффективностью около 56 % находился «в зените славы». Двигатели с турбоагнетателями компании BBC/ABB побивали один за другим рекорды по мощности и эффективности.

4 Прогресс технологии турбоагнетателя в 1925–1945 гг.: оба турбоагнетателя предназначены для двигателей одинакового объёма, слева более компактный агнетатель VTR320, обеспечивающий большее давление наддува по сравнению с более ранним VT402 (справа).



5 Двухтактный дизель 9 RLA90 компании Sulzer мощностью 32 400 л.с. с тремя турбоагнетателями VTR714 производства японской компании IHI.



Всегда в первых рядах

Появление нагнетателя VTR..1

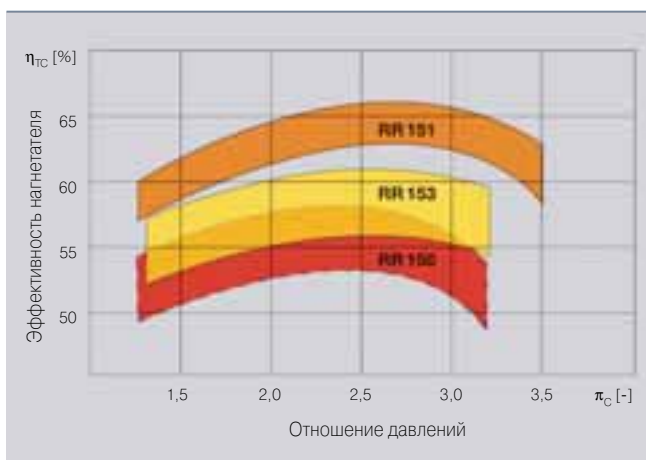
В 1950–60 гг. велась разработка новых образцов компрессоров с ещё более высокими эффективностью, отношениями давлений и расходами воздуха. Была усовершенствована конструкция подшипников, а все крепления были усилены. В 1970 г. появились компрессоры с ещё большим расходом воздуха и с увеличенными размерами каналов для выпуска газов. Была переработана также конструкция выпускного направляющего аппарата турбины.

Все описанные новшества в 1971 г. воплотились в новой серии нагнетателей VTR..1. С этого времени компания Браун Бовери могла предложить турбоагнетатели с эффективностью почти 60 % для самого разнообразного применения. Если учесть, что в этой области рост эффективности был хотя и устойчивым, но весьма медленным, указанное значение можно считать первым большим скачком.

Нагнетатель VTR..4 обеспечивает очередной рывок

К середине 1970х гг. нагнетатель VTR..1 практически уже исчерпал себя, как концепцию. А на кульманах уже вырисовывались черты нового семейства нагнетателей из компонентов с полностью переработанной конструкцией. В конце 1978 г. коммерческую прессу ознакомили с результатами испытаний следующего прототипа турбоагнетателя, VTR..4, а годом позже он вышел на рынок. Будучи свободным от ограничений, налагавшихся на первые нагнетатели серии VTR, новый нагнетатель имел большую на 5 % эффективность, а максимальное отношение давлений в компрессоре превышало 4. Кроме того, новый нагнетатель позволил ощутимо повысить тепловую эффективность больших двигателей при полной нагрузке – с 38–40 % до максимального значения 44–46 % (рис. 5).

6 Турбоагнетатель RR..1 с турбиной, работающей со смешанным потоком, и рабочим колесом компрессора с лопатками прямой стреловидности.



В 1980 г. появилась компактная модификация с использованием большого количества деталей и узлов турбоагнетателя VTC..4, что открыло новые возможности на рынке США. Новый нагнетатель стал также успешно применяться на локомотивах в Индии, а позже и в Китае. Изменяющийся рынок требовал разработки и неохлаждаемой модификации нагнетателя VTR..4.

Очередной прорыв произошёл в 1985 г. с появлением турбоагнетателя RR..1 (рис. 6). Будучи предназначенным в первую очередь для высокооборотных четырёхтактных двигателей, новый нагнетатель явил собой новый стандарт эффективности для малогабаритных турбоагнетателей, т.е. в той области, где компания Браун Бовери серьёзно работала с 1968 г, начав с нагнетателя RR150.

В последующие годы применение нагнетателя RR..1 способствовало росту популярности высокооборотных двигателей и расширению их применения – от аварийных дизель-генераторов до судовых силовых установок и двигателей для транспортных средств высокой проходимости.

Новый нагнетатель, рассчитанный на двигатели с мощностью на валу от 500 до 1800 кВт, стимулировал широкое применение таких турбоагнетателей в двигателях на газообразном топливе в Европе и США.

Одновременно продолжал совершенствоваться и турбоагнетатель VTR..4, пиковое значение эффективности которого в 1989 г. было доведено почти до 75 % в модели VTR..4E, а отношение давлений – до значения, превышающего 4 (модель VTR..4P, вышедшая на рынок в 1991 г.).

Новый скачок – создание семейств нагнетателей TPS и TPL

В 1989 г., вслед за слиянием компаний ASEA и BBC в одну компанию АББ, была образована компания ABB Turbo Systems Ltd для развёртывания бизнеса, связанного с внедрением новых семейств турбоагнетателей. «Смена вывески» совпала с другим достижением – проводившиеся в середине 1980-х гг. маркетинговые исследования показали, что новые и являющиеся эталоном технического уровня турбоагнетатели востребованы во всех основных сферах бизнеса. В двигателестроительной промышленности происходила консолидация. Новые поколения дизельных и бензиновых двигателей разрабатывались меньшим числом более сильных и приверженных инновациям компаний. Для этих двигателей требовались более эффективные турбоагнетатели с большим отношением давлений и большей производительностью.

В начале 1990-х гг. компания АББ приступила к разработке нового поколения компактных облегчённых турбоагнетателей с высокими характеристиками, идущих на замену нагнетателям серий VTR, VTC и RR, в результате были вновь разработаны два семейства нагнетателей: TPS и TPL.

7 Судовые двигатели контейнеровозов – важный сегмент рынка для наиболее мощных турбоагнетателей от компании АББ.



Дебют семейства TPS

Со времени внедрения в 1968 г. первых турбоагнетателей семейства RR рынок высоко- и среднеоборотных двигателей очень быстро менялся. Поэтому компания АББ начала разработку совершенно нового поколения малогабаритных форсированных турбоагнетателей четырёх типоразмеров с целью удовлетворения предвидимого спроса в этой области. Вначале были разработаны два компрессора с отношением давлений до 4,5 и эффективностью выше 84 %.

Прогрессивные изменения на рынках дизельных и бензиновых двигателей в середине 1990-х гг. привели к появлению модификации турбоагнетателя семейства TPS с «изменяемой геометрией турбины». Такой «подстраиваемый» турбоагнетатель представлялся идеальным решением для дизельных двигателей с быстро набиравшим популярность однотрубным выхлопом, равно как и для бензиновых двигателей, где требовалось достаточно точно регулировать состав смеси горючего с воздухом (т.н. «лямбда-регулирование»).

Стартует семейство TPL

Это семейство турбоагнетателей создавалось для современных дизельных и бензиновых двигателей большой мощности (от 2500 кВт и выше). Для этого семейства инженеры компании АББ разработали новые осевые турбины, подшипниковые узлы новой конструкции и две дополнительные ступени центробежного компрессора.

Первым появившимся на рынке турбоагнетателем семейства TPL был агнетатель TPL.-А, разрабатывавшийся для четырёхтактных дизельных и бензиновых двигателей мощностью от 2500 до 12 500 кВт. Успех его появления в 1996 г. был ошеломляющим. Пять типоразмеров этого турбоагнетателя позволяли применять его как в основных и вспомогательных силовых установках судов, так и в стационарных установках на электростанциях.

Три года спустя компания АББ выпустила свои первые турбоагнетатели модели TPL.-В, разработанные для современных мощных судовых дизелей мощностью 5000–25 000 кВт (приходящейся на один турбоагнетатель), устанавливаемых на большие океанские суда (рис. 7).

Неуклонное повышение эффективности турбоагнетателей и двигателей всегда опиралось на тесное сотрудничество компании АББ и ведущих производителей двигателей.

Первоначально считалось, что для двигателей средней мощности вполне достаточно четырёх типоразмеров турбоагнетателей. Позднее было решено добавить пятый, для ещё более мощных агнетателей (TPL91) в свете намечавшейся постройки судов-контейнеровозов ещё больших размеров, позволяющими пройти по Панамскому каналу и водоизмещением обычно не более 65 000 тонн). При этом перед инженерами компании АББ стояла ещё одна сложная задача: турбоагнетатель должен оставаться компактным, даже если он предназначен для двигателей эффективной мощностью свыше 100 000 л.с.! Задача была решена конструированием нового, более короткого ротора и новой турбины постоянного давления с диффузором. Установка на двигатель была облегчена наличием у него встроенного маслобака (рис. 8).

Новый турбоагнетатель для тяговых средств железных дорог

Агнетатель TPL прослужил основой для агнетателя TPR, предназначенного для использования

на тяговом подвижном составе железных дорог. Этот агнетатель был выпущен компанией АББ в 2002 г. В его конструкции учтены особые требования к надёжности и к способности работать с перегрузкой, а также отраслевые требования по охране окружающей среды. Особенности турбоагнетателя TPR являются высокоэффективная турбина с усовершенствованным однопоточным входным направляющим аппаратом и уникальная конструкция крепления основания.

Планка уровня отношения давлений продолжает повышаться

К сохраняющейся в двигателестроении тенденции повышения удельной мощности двигателей сегодня добавляется неотложная необходимость сократить выбросы в атмосферу, что заставляет вводить в большинстве современных двигателей т.н. «цикл Миллера»²⁾. Для таких двигателей – сегодняшних и тех, которые ещё только появятся – компания АББ разработала семейство турбоагнетателей TPS.-F (рис. 9). Три новых серии перекрывают диапазон мощностей двигателей от 500 до 3300 кВт, а отношение давлений в них при полной нагрузке приближается к значению 5,2. Материалом для рабочего колеса компрессора в этих агнетателях является алюминисевый сплав.

²⁾ Основопологающим принципом «процесса Миллера» является тот факт, что эффективность такта сжатия не изменится, если этот такт сделать короче такта расширения путём изменения фаз впуска. При неизменных мощности двигателя и степени форсирования давления, степень наполнения цилиндров уменьшается, что приводит к снижению давления и температуры в цилиндрах и в конечном счёте к снижению вредных выбросов.

8 Турбоагнетатель TPL91-В в сборе.



9 Турбоагнетатель TPS.-F.



Всегда в первых рядах

10 Турбоагнетатель TPL76...-С разработан для усовершенствованных 4-тактных двигателей.



Нагнетатели семейства TPS...F стали для компании АББ первыми, где применена рециркуляция потока: радиальный зазор компрессора выбран таким образом, что улучшается спектр обтекания воздушного потока, а это увеличивает запас компрессора по помпажу. В конечном счёте это расширяет пределы регулировочных характеристик двигателя при сохранении высокой эффективности наддува.

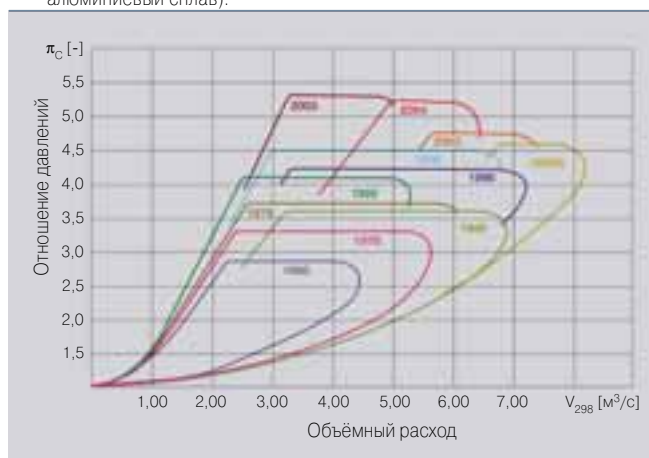
Турбоагнетатель для усовершенствованных четырёхтактных двигателей

В новое тысячелетие рынок четырёхтактных двигателей входит, подталкиваемый требованиями всё большей выходной мощности и всё меньшего уровня вредных выбросов. Поэтому компания АББ решила использовать модульную платформу семейства нагнетателей TPL для внедрения новых компонентов и новейших технологий в новой серии нагнетателей TPL...-С, специально предназначенных для перспективных двигателей.

Как работает турбоагнетатель

Мощность двигателя внутреннего сгорания определяется количеством воздуха и топлива, которое можно «вдавить» в цилиндр двигателя, и числом оборотов. Турбоагнетатель подаёт воздух в цилиндры двигателя под большим давлением, что увеличивает количество кислорода в цилиндре для сгорания топлива. Выхлопные газы с температурой около 600 °С покидающие двигатель, с большой скоростью направляются на лопатки турбины нагнетателя, на одном валу с которой находится компрессор. Рабочее колесо последнего засасывает воздух из окружающей среды через фильтр с глушителем шума, сжимает этот воздух и после охлаждения подаёт в воздушный резервуар, откуда воздух подаётся в цилиндры при тактах впуска.

11 Совершенствование характеристик компрессоров в турбоагнетателях компании АББ с 1960 г. (при полной нагрузке, материал компрессоров – алюминиевый сплав).



Под такими двигателями подразумеваются усовершенствованные четырёхтактные среднеоборотные дизельные и бензиновые двигатели мощностью от 3000 до 10 000 кВт (на один нагнетатель). В турбоагнетателях серии TPL...С имеется две раздельных турбины: одна для систем как с квазипостоянным давлением, так и с пульсациями давления, а другая – только для систем с квазипостоянным давлением. Новшеством в компрессоре является опция воздушного охлаждения, что расширяет сферу применения компрессоров с рабочими колёсами из алюминиевого сплава как экономичной альтернативы рабочим колёсам из титана в тех случаях, когда требуются очень высокие отношения давлений.

К сохраняющейся в двигателестроении тенденции повышения удельной мощности двигателей сегодня добавляется неотложная необходимость сократить выбросы в атмосферу.

Столетие прогресса

За 100 лет, прошедших после получения Бюхи патента в 1905 г.³⁾, турбоагнетатель, использующий энергию выхлопных газов, стал неотъемлемой частью многих дизельных и бензиновых двигателей. Многолетние вложения средств в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы привели к своего рода «квантовым скачкам» в технологии и конструкции и полностью оправдались тем, что цели, которые ставил технический прогресс, достигнуты в виде неизменно высоких технических характеристик турбоагнетателей на протяжении многих лет.

Неуклонное повышение эффективности как турбоагнетателей, так и двигателей всегда опиралось на тесное сотрудничество компании АББ и ведущих производителей двигателей. Именно в этом сотрудничестве рождаются ориентиры для развития и, судя по всему, это сотрудничество будет только крепнуть по мере того, как будут расти требования не только к турбоагнетателям, но и к системам турбонаддува в целом.

Для компании АББ турбоагнетатели TPS и TPL, технологически весьма совершенные, являются достойной заменой в высшей степени удачных нагнетателей серий VTR и RR. Поскольку рынок по-прежнему требует всё большего форсирования давления наддува и всё большей эффективности – и не в последнюю очередь из-за их влияния на снижение вредных выбросов – будущее по-прежнему за турбоагнетателями, в которых указанные преимущества будут сочетаться с очень высокими характеристиками и большими сроками между обслуживаниями.

Малькольм Саммерс

ABB Turbo Systems Ltd.
Баден, Швейцария
malcolm.summers@ch.abb.com

³⁾ Вся история турбоагнетателей, созданных компанией ВВС/АВВ, изложена в юбилейном выпуске журнала Turbo Magazine (2/2005), издание АББ Turbo Systems.