

ТУРБОКОМПРЕССОРЫ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ДОКЛАДАХ КОНГРЕССА SIMAC 2010

Г.Е. Ципленкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н., А.А. Коженков, инж., А.Н. Сухарев, к.т.н.
ООО «ТУРБОКОМ»

В настоящее время одна из главных проблем силовых установок с двигателями внутреннего сгорания — снижение эмиссии вредных веществ, в первую очередь NO_x . В каждой области применения двигателей действуют собственные нормы ограничения эмиссии — IMO, EPA, TA-Luft, UIC, которые периодически ужесточаются. Так, в соответствии с требованиями IMO II с 2011 г. эмиссия NO_x должна быть уменьшена примерно на 20 %. Такое снижение NO_x может быть достигнуто при использовании цикла Миллера, для реализации которого требуется турбокомпрессор с высокой степенью повышения давления. Кроме того, сохраняется тенденция форсирования двигателей по среднему эффективному давлению, что также требует установки турбокомпрессоров с высокой степенью повышения давления. Все ведущие фирмы по производству турбокомпрессоров совместно с двигателестроителями активно ведут работы по созданию таких агрегатов, о чем свидетельствуют материалы докладов, представленные на конгрессе SIMAC 2010.

1. Новые турбокомпрессоры для двигателей более высокой форсировки с жесткими требованиями по эмиссии [1].

Фирма АВВ представила на рынок ряд турбокомпрессоров (ТК) ряда А100, которые позволяют удовлетворить требования IMO II по снижению эмиссии NO_x за счет совершенствования рабочего процесса. Жесткие требования по эмиссии требуют более высокой степени повышения давления (СПД) и более высокого КПД ТК для всех типов двигателей. СПД в ТК для высокооборотных (ВОД) и среднеоборотных двигателей (СОД) достигают значений 5,8, а в ТК малооборотных двигателей (МОД) — 4,7 с максимальным КПД 75 % на частичных нагрузках (рис. 1.1, 1.2).

В соответствии с назначением двигателя и конкретными требованиями предлагаются три серии ТК: ТК А100-Н — для ВОД, работающих на соляре и газе; ТК А100-М — для СОД, работающих на тяжелом топливе, соляре и газе; ТК А100-Л — для МОД, которые работают на тяжелом топливе.

Потребность в комплектации ВОД и части СОД покрывается ТК с радиальной турбиной, часть СОД с большими расходами комплектуется ТК с осевой турбиной. ТК типа А100-Н и А100-М с радиальной турбиной являются модернизированным вариантом ТК серии TPS, ТК типа А100-М с осевой турбиной спроектирован на основе ТК серии TPL-C, ТК типа А100-Л с осевой турбиной разработан на основе ТК серии TPL-B, что обеспечивает идентичность присоединительных размеров новых ТК по отношению к предшествующим моделям.

Система наддува с постоянным давлением применяется как на МОД, так и на ВОД. Однако для

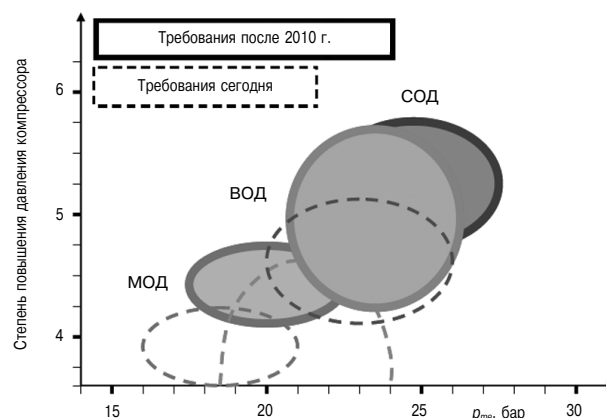


Рис. 1.1. Требуемые степени повышения давления в компрессоре в зависимости от типа двигателей и среднего эффективного давления

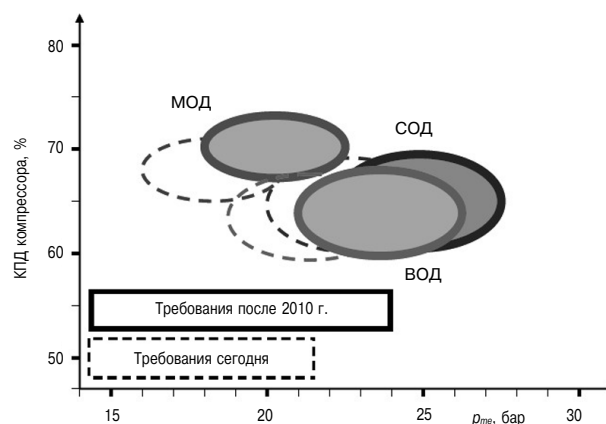


Рис. 1.2. Требуемые КПД турбокомпрессора в зависимости от типа двигателя и среднего эффективного давления

ВОД требуются более высокие СПД, поэтому системы наддува ВОД имеют более низкий КПД. Импульсная система наддува находит применение на ВОД и СОД, поскольку позволяет использовать энергию выпускного импульса в турбине.

Учитывая тенденцию ужесточения нормативов выбросов вредных веществ, фирма АВВ считает, что для удовлетворения требований ИМО II системы наддува двигателей различных типов должны иметь параметры, значения которых приведены на рис. 1.1 и 1.2. При этом наиболее высокие значения параметров наддува требуются для газовых двигателей, что связано с необходимостью устранения детонации. Анализ термодинамических требований к ТК показывает небольшое расхождение между условиями их применения на ВОД и СОД и заметную разницу с условиями применения на МОД.

Топливная экономичность и эмиссия NO_x связаны обратно пропорциональной зависимостью, справедливой для двигателей любой быстроходности. Если двигатель настроен на уменьшение эмиссии, то удельный расход топлива увеличивается. При раннем начале сгорания снижается топливная экономичность, при позднем начале сгорания уменьшается эмиссия NO_x (рис. 1.3). Однако увеличение давления в воздушном ресивере и повышение КПД ТК может компенсировать в какой-то степени падение топливной экономичности. Результаты испытаний на двигателе с исходным давлением наддува 4,2 бара в воздушном ресивере и КПД ТК 66 % показывают возможности регулирования характеристик двигателя за счет изменения характеристик ТК.

Необходимость компенсации потерь экономичности при снижении выбросов зависит также от типа двигателя, качества топлива и его цены. Например, для ВОД мощностью 1000 кВт, работающего на соляре, уменьшение топливной экономичности на 1 г/кВт·ч приводит к увеличению расходов на эксплуатацию примерно \$3400 за 5000 ч работы. Для МОД мощностью 50 МВт,

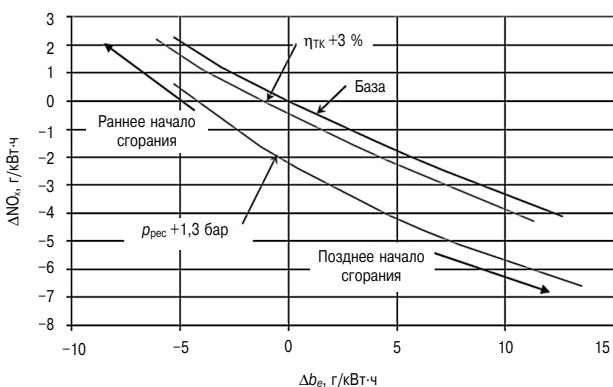


Рис. 1.3. Влияние давления воздуха в ресивере и КПД ТК на эмиссию NO_x и удельный расход топлива

работающего на тяжелом топливе, уменьшение топливной экономичности на 1 г/кВт·ч приводит к потере \$120 000 за 5000 ч работы. Эти данные указывают на возможность быстрой окупаемости ТК с высоким КПД.

В сравнении со своими предшественниками ТК типа А100 обеспечивают улучшение характеристик систем наддува для всех типов двигателей. На рис. 1.4 и 1.5 представлены поля расходов и КПД ТК в сравнении с предыдущими агрегатами. Для всех ТК нового ряда СПД увеличена примерно на 0,5 (рис. 1.4). Для ТК А100-Л достигнуто заметное увеличение КПД на частичных нагрузках (см. рис. 1.5).

Улучшение характеристики двигателя зависит не только от КПД ТК, но и его настройки при установке на двигателе. Контрольная рабочая точка требует такой настройки компрессора и турбины на заданные параметры расхода, при которой характеристики колеса компрессора и лопаточного диффузора, так же, как колеса турбины и соплового аппарата, должны быть согласованы. Увеличенные СПД в ТК типа А100 достигнуты за счет разработки новых ступеней компрессора с оптимизированным расположением лопаток и улучшенными характеристиками

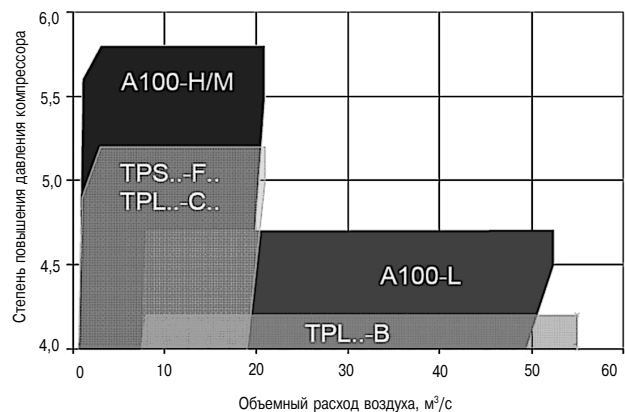


Рис. 1.4. Поля расходов воздуха ТК ряда А100 в сопоставлении с предыдущими рядами ТК

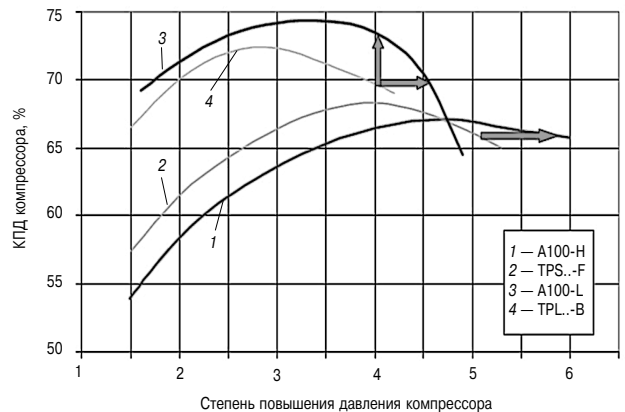


Рис. 1.5. Сравнение КПД ТК А100-Н и А100-Л с ТК TPS..-F и TPL..-B

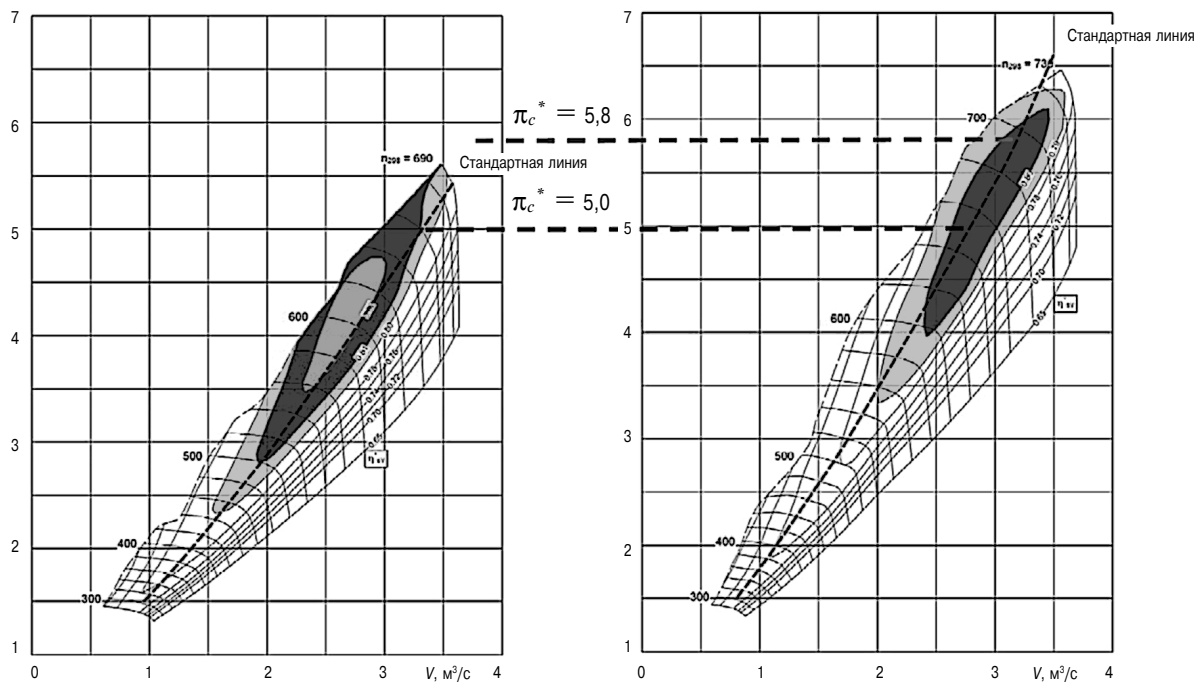


Рис. 1.6. Характеристики компрессоров фирмы АВВ рядов А100-Н и TPS.-F

диффузора. В ТК типа А100-Л встроена система рециркуляции воздуха, оптимизированная по условиям эксплуатации ТК серии TPS и TPL, при этом заданные значения СПД достигаются при использовании колес компрессора из алюминиевых сплавов. Таким образом, благодаря охлаждению колеса компрессора появилась возможность отказаться от таких дорогих материалов, как титан. Охлаждение выполняется воздухом, отбираемым из ресивера после его охлаждения, как это выполнено на ТК серии TPL-С.

На рис 1.6 приведены характеристики новых компрессоров для ВОД и СОД двигателей в сопоставлении с серийно выпускаемыми ТК.

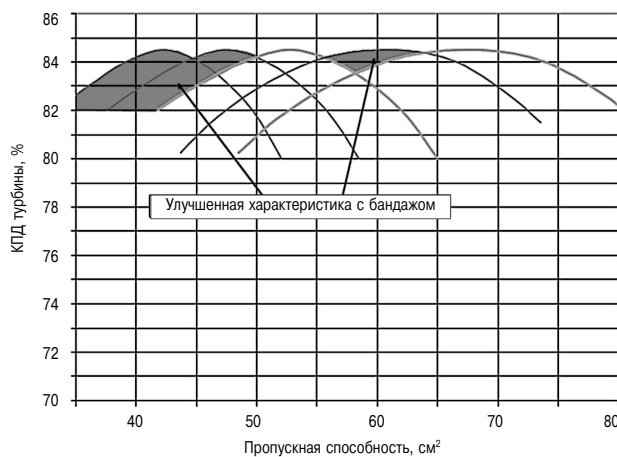
Расход воздуха в новых ТК увеличен за счет увеличения диаметра колес при сохранении тех же размеров корпусов. Особое внимание было

уделено механической прочности ТК А100-Н и А100-М из-за высоких окружных скоростей ротора. ТК типа А100-М и А100-Л с осевой турбиной характеризуются оптимизированными газоприемными и газовыпускными корпусами и полностью обновленной конструкцией турбинных ступеней. Для ТК с осевой турбиной применено бандажирование рабочего колеса, что позволяет получить более высокий КПД, достигающий 84 % в области пропускной способности турбин от 39 до 73 см² (рис. 1.7).

С учетом опыта эксплуатации была сохранена конструкция демпферных подшипников скольжения. Упорный подшипник с плавающим диском также сохранен в конструкции ТК с осевой турбиной. Для ТК А100-Л используется модернизированный подшипник, заимствованный от



Рис. 1.7. Конструкция и характеристика турбины с покрывающим диском



ТК серии TPL-B, со смазкой из масляной емкости, встроенной в корпус подшипника с установочным кронштейном.

Более высокие давления воздуха и газа, а также более высокая кинетическая энергия вращающихся частей привела к необходимости усиления корпусов. Каналы для охлаждения компрессора на ТК A100-N и A100-M встроены в корпус подшипников в пределах тех же размеров, что и на выпускаемых ТК.

Фирма АВВ успешно использует регулирующую турбину (РТ) на серийных ТК и предусматривает возможность ее применения на всех новых ТК. Реальное введение РТ на ТК ряда A100 будет зависеть от требований рынка. Для некоторых модификаций ТК A100-L фирма АВВ уже поставила на рынок ТК с РТ. Поставка включает блок управления, привод и элементы РТ. Чтобы облегчить быструю установку и упростить кабельную систему подключения, фирма АВВ установила блок управления на корпусе ТК, что позволило сохранить те же присоединительные размеры, что и ТК с неподвижными сопловыми аппаратами.

Для МОД интервалы замены роторов и подшипников ТК A100-L остаются теми же самыми, что и для TPL-B, несмотря на более высокие нагрузки. Сервисная служба фирмы АВВ уделяет большое внимание удобству обслуживания и предложила заказчикам эндоскопическое обследование ТК типа A100, что позволяет избежать разборки турбины для осмотра и значительно сокращает потери времени на обслуживание.

Турбокомпрессоры типа A100 предварительно подвергаются фирменным квалификационным испытаниям перед запуском в производство. Окончательная проверка их надежности завершается эксплуатацией на двигателе. Фирма поддерживает близкие связи с двигателестроителями на всех стадиях разработки, что позволяет выявить в конструкции недостатки и устранить их перед запуском в серийное производство.

2. Новый турбокомпрессор ТСА33 фирмы МАН для быстроходных дизелей [2].

Турбокомпрессор типа ТСА33-42 фирмы МАН был разработан для нового ряда четырехтактных ВОД размерности V28/33D с числом цилиндров от 12 до 20. Он является самым маленьким ТК ряда ТСА с осевой турбиной и перекрывает поле производительностей больших турбокомпрессоров ряда TCR с радиальной турбиной (рис. 2.1). При его проектировании были выполнены следующие специфические требования.

➤ Минимальный момент инерции ротора, что определило выбор осевой турбины, хотя фирма имеет аналогичные параметры ТК ряда TCR с радиальной турбиной.

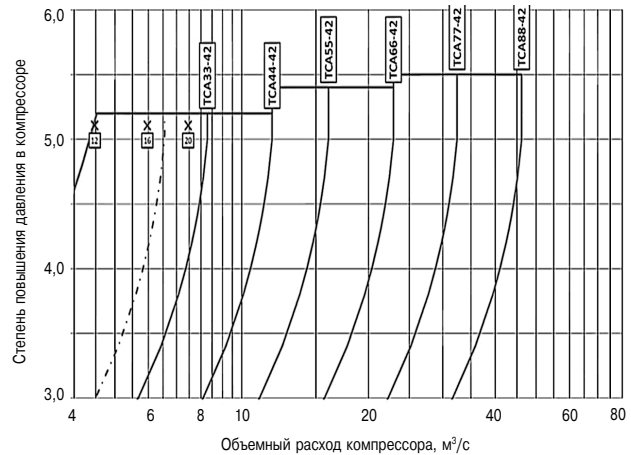


Рис. 2.1. Поля расходов турбокомпрессоров ряда ТСА

➤ Максимальная компактность конструкции, достигнутая за счет того, что газоподводящие и воздушные патрубки ТК являются частью коллекторов двигателя.

➤ На двигатель устанавливается два ТК для улучшения качества переходных процессов.

Двигатель V28/33D мощностью 5000 кВт спроектирован под цикл Миллера, поэтому для удовлетворения требований ИМО II, требуется ТК со СПД не менее 5,2. Профилирование колеса, выполненное на основе опыта проектирования ТК ряда TCR, позволяет получить широкую характеристику компрессора и высокий КПД (рис. 2.2). Для расширения рабочего диапазона характеристики компрессора используется рециркуляция воздуха на входе в компрессор.

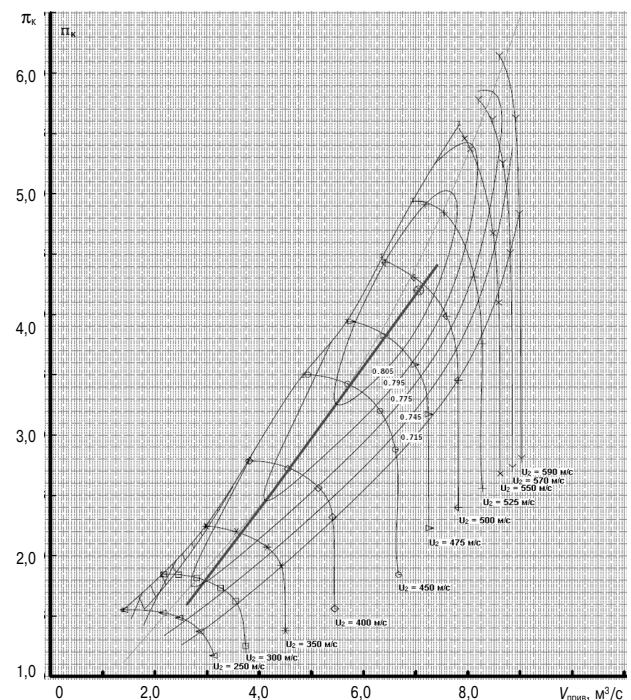


Рис. 2.2. Характеристика компрессора ТК ТСА33-42 с рабочей линией двигателя V28/33D, удовлетворяющего требованиям ИМО II

Колесо компрессора изготовлено из алюминиевого сплава. Для предотвращения его старения при степенях повышения давления выше 4,7 и температуре металла, превышающей 200 °С, вводится охлаждение водой из циркуляционной системы двигателя. Эффект водяного охлаждения, по мнению фирмы, эквивалентен воздушному, но позволяет избежать снижения КПД ТК.

Корпус подшипников оборудован охлаждающим каналом, расположенным вблизи лабиринта рабочего колеса (рис. 2.3). Канал закрыт стенкой со стороны компрессора. Температура колеса компрессора понижается в результате теплообмена между воздухом и водой через стенку. Для уменьшения теплового сопротивления толщина стенки и воздушный зазор должны быть минимальными. Лабиринты на колесе компрессора действуют как охлаждающие ребра и увеличивают поверхность охлаждения. Для изоляции охлаждающего канала от масляной полости между ними введен дренажный канал, выполненный в корпусе подшипников. В случае повреждения уплотнения охлаждающего канала вода поступит в дренажный канал, и будет удаляться наружу.

Колесо компрессора ТСА33-42 устанавливается на конус и навинчивается на турбинный вал. Используются трехклиновые опорные втулки серийного ТК TCR22, имеющего тот же диаметр вала, что и ТСА33-42. Упорный подшипник подобен подшипникам ряда ТК ТСА. Вместо бронзового используется стальной упорный диск со специальным покрытием DLC толщиной несколько микрон, по твердости близкой к алмазу. Форма клиновых поверхностей оптимизирована, наружный диаметр втулки увеличен для улучшения несущей способности.

Для получения высокого КПД и обеспечения настройки на параметры двигателя турбина по исполнению рабочего колеса, соплового аппарата

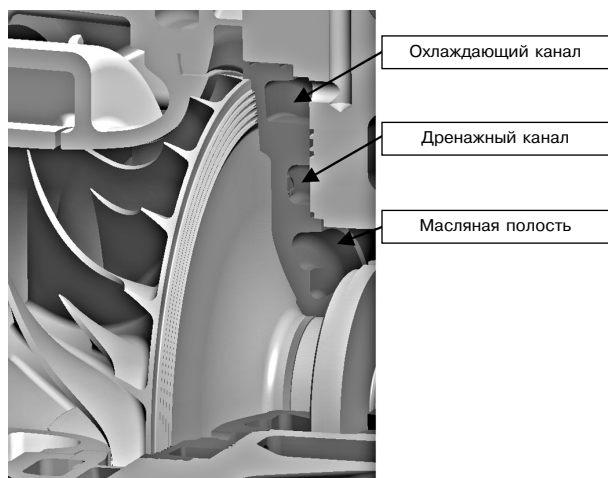


Рис. 2.3. Охлаждение колеса компрессора ТК ТСА33-42

и выходного диффузора полностью соответствует ТК ТСА.

Для удовлетворения требования возможности использования одного и того же ТК на весь ряд двигателей V28/33D с различным числом цилиндров были разработаны два различных ротора, которые могут устанавливаться в те же самые корпуса. Малый ротор используется для наддува 12- и 16-цилиндровых двигателей, большой — для 16- и 20-цилиндровых двигателей. В этом случае 16- и 20-цилиндровые двигатели будут иметь хорошее качество переходных процессов.

Колесо компрессора с малым ротором подобно по геометрии лопаток колесу большого агрегата. Благодаря современной технологии 5-координатной обработки его достаточно легко изготовить.

Соединение рабочих колес с валом и подшипники аналогичны для обоих вариантов ТК. Все ТК оборудованы вставками на стороне компрессора, которые позволяют легко изменять контур проточки колеса. Кроме того, колесо может быть удалено при извлеченной вставке без снятия с двигателя основного корпуса компрессора, что значительно уменьшает время обслуживания.

Для снижения стоимости и затрат времени на производство заготовок лопаток турбины для малого ротора были использованы лопатки большого ротора с установкой уменьшенного их числа на турбинном диске меньшего размера.

Для сокращения габаритов на двигателе кронштейн установки ТК встроен в корпус подшипников, а газоприемный корпус специально спроектирован для этого двигателя как завершающая часть выпускного коллектора (рис. 2.4).

Газовыпускной и газоприемный корпуса, кронштейн турбины и места соединений с кор-

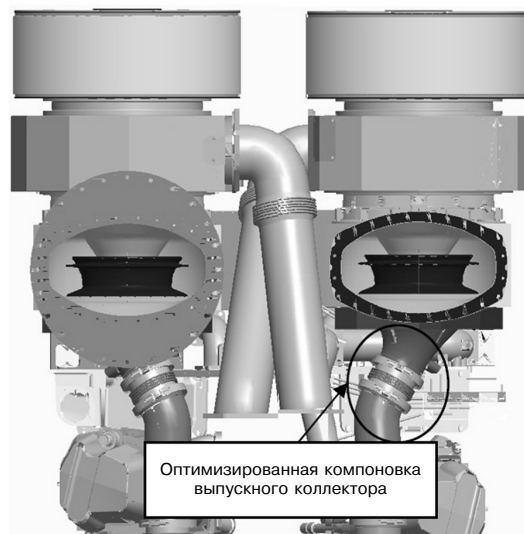


Рис. 2.4. Компактная установка двух турбокомпрессоров на двигателе

пусом подшипников покрыты высоко эффективной теплоизоляцией, чтобы выполнить требования SOLAS по предельным температурам поверхностей.

3. Высокоэффективные малоразмерные турбокомпрессоры [3].

Фирма PBS Turbo (Велка Битиш) выпускает ТК более 50 лет. Изменение СПД в ТК, выпущенных ею, представлено на рис. 3.1. Фирма имеет определенный опыт в проектировании ТК и в настоящее время наряду с другими изготавливает ТК ряда TCR, разработанного фирмой MAN.

Для снижения эмиссии ВОД массового производства в диапазоне мощностей 300–900 кВт конструкторы двигателей используют цикл Миллера. В связи с этим необходимы ТК с диапазоном расходов 0,5–1,2 кг/с на высокие СПД. Для заполнения этой ниши рынка фирма PBS расширила ряд ТК TCR в сторону меньших расходов двумя новыми типоразмерами TCR12 и TCR10. На основе моделирования была сделана оценка диапазона требуемых СПД и КПД новых ТК для одноступенчатой и двухступенчатой системы наддува (рис. 3.2).

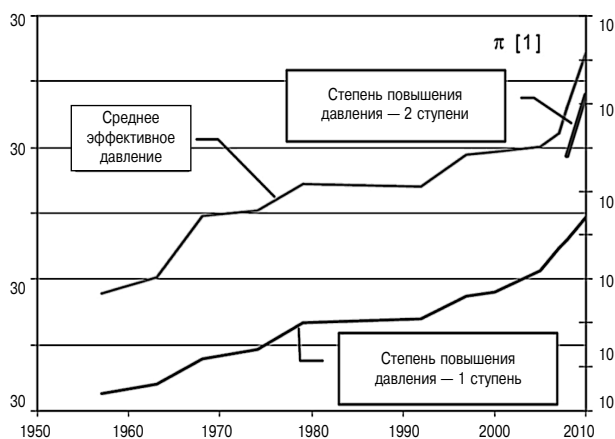


Рис. 3.1. Изменение среднего эффективного давления двигателей и степени повышения давления ТК PBS Turbo

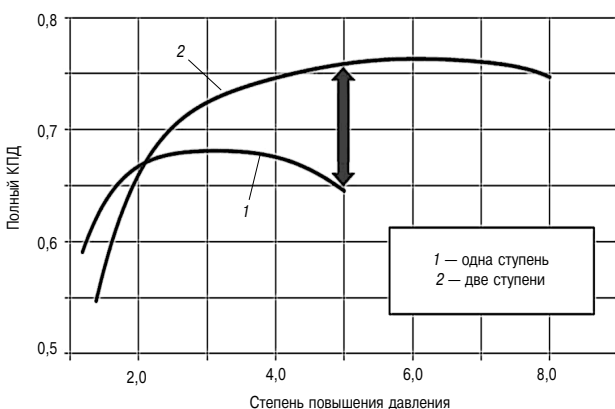


Рис. 3.2. Требуемые степени повышения давления и КПД турбокомпрессоров

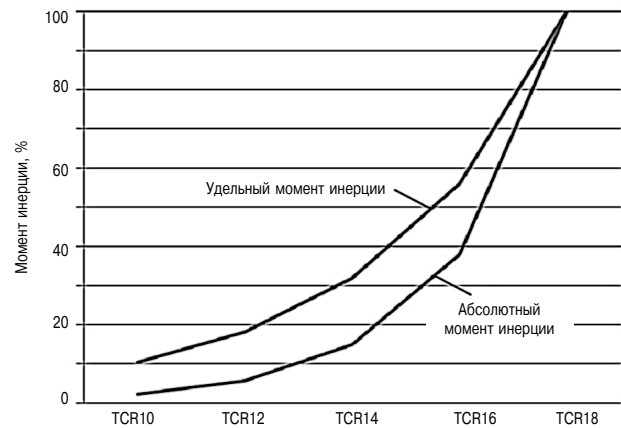


Рис. 3.3. Момент инерции турбокомпрессоров ряда TCR

ТК TCR12 и TCR10 имеют идентичную конструкцию, которая несколько отличается от ТК большего типоразмера. Проточные части созданы на основе современных вариантов компрессора и турбины ряда TCR, находящегося в производстве. Применяются два вида колеса компрессора: первое предназначено для меньших расходов со степенью повышения давления до 5 и выше; второе покрывает область поля с большими расходами и со степенью повышения давления до 4,8. Стабилизация течения в компрессоре обеспечивается рециркуляцией потока воздуха на входе. Для повышения КПД и удобства настройки на двигателе устанавливается лопаточный диффузор и сопловой аппарат.

Лопаточный диффузор компрессора является частью корпуса подшипников и расположен с тыльной стороны колеса компрессора. Имеется корпус подшипников с охлаждением тыльной стороны колеса компрессора, что позволяет использовать для изготовления колеса алюминиевый сплав даже при степени повышения давления более 5 и обеспечить приемлемую долговечность конструкции.

Некоторые изменения в конструкции подшипников и корпусов были необходимы из-за меньшего размера и требований технологии производства. Оптимизация геометрии корпуса турбины и использование новых материалов, работающих при температуре на входе свыше 700 °С, обеспечили высокую надежность.

Использование ТК меньшего размера позволяет снизить его момент инерции и получить выигрыш в стоимости. На рис. 3.3 представлено изменение момента инерции роторов ТК ряда TCR. Одна кривая представляет собой значение момента инерции в процентах от момента инерции ТК TCR18, вторая — удельный момент инерции, отнесенный к массе потока. Вторая кривая дает возможность оценить реальное влияние на динамические характеристики ТК. Например, ТК TCR14

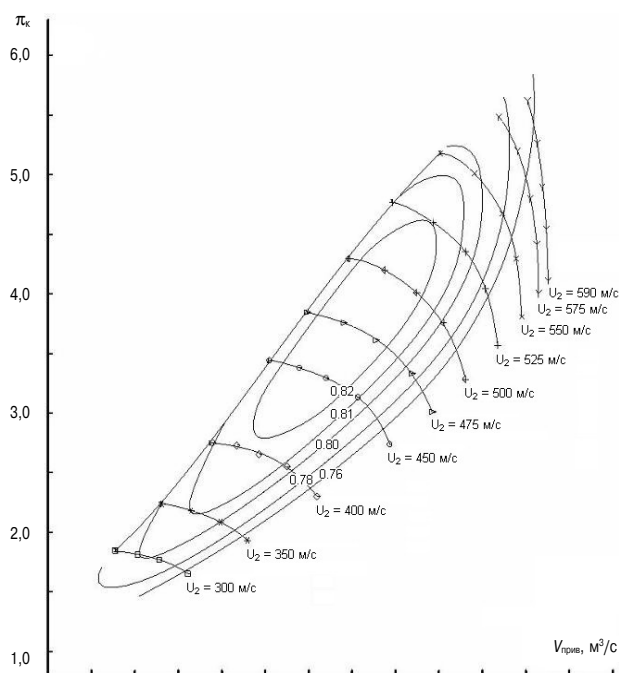


Рис. 3.4. Характеристика компрессора TCR12 с геометрией колеса RCF

может быть заменен двумя ТК TCR10, при этом момент инерции двух ТК TCR10 будет составлять 1/3 от момента инерции TCR14.

Трехклиновые поверхности опорных подшипников выполнены на внутренней поверхности качающейся моноштулки. Смазка в зазоре между наружной поверхностью моноштулки и поверхностью корпуса образует демпфер со сдвигаемой пленкой. Подшипники были изготовлены из нового сплава с меньшим содержанием свинца, что гарантирует хорошее скольжение и износостойкость. Динамика роторов всех ТК ряда TCR была смоделирована и проверена экспериментально при температуре масла на входе 70 °C и 115 °C.

Для повышения несущей способности упорный подшипник смещен с середины ротора в сторону колеса компрессора.

Разработаны также новый фильтр меньшего размера с лучшим шумоглушением и эффективная изоляция.

Проектирование проточных частей ТК выполнялось с использованием теории подобия на маленькие (RCF) и большие (RCQ) расходы.

Характеристика компрессора TCR12 с геометрией RCF на малые расходы показана на рис. 3.4.

После доработки по результатам стендовых испытаний и эксплуатации ТК TCR 12 был запущен в производство. ТК TCR 10 находится в стадии подготовки производства.

Заключение

Приведенные в настоящем обзоре материалы демонстрируют существенное влияние характеристик систем наддува на показатели экономичности и вредных выбросов с отработавшими газами двигателей, в особенности эмиссии NO_x. Для удовлетворения потребности рынка в экономичных двигателях, одновременно соответствующих жестким нормам вредных выбросов, производители двигателей используют новые малотоксичные рабочие процессы, такие как цикл Миллера или процесс газового двигателя с высоким сжатием бедной смеси. Необходимость реализации этих процессов определила основные тенденции развития агрегатов и систем наддува, которые можно сформулировать следующим образом:

- увеличение степени повышения давления ТК с одноступенчатой системой наддува до 5,5–6,0;
- повышение КПД ТК до 75 % во всем диапазоне скоростных и нагрузочных характеристик двигателей;
- применение регулируемых турбокомпрессоров с системой управления, интегрированной в общую систему управления двигателем;
- улучшение динамических характеристик ТК для обеспечения качественных переходных процессов двигателя в эксплуатации.

Материалы настоящего обзора демонстрируют, что ведущие производители агрегатов наддува успешно реализуют эти тенденции в своей новой продукции, выпускаемой на рынок.

Литература

1. Neuenschwander P., Thiele M., Seiler M. New turbochargers for more powerful engines running under stricter emissions regimes. Paper № 128, CIMAC 2010, Bergen.
2. Bartholomae K., Boel E., Balthasar D. TCA33 - The new MAN Diesel turbocharger for high-speed engines. Paper № 141, CIMAC 2010, Bergen.
3. Klima J., Martin V., Tomec O. High Performance Small Turbochargers. Paper № 188, CIMAC 2010, Bergen.