

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС

Н. В. Савенков; Н. В. Сергеев

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. В статье выполнен обзор особенностей конструкции, применения и регулирования турбокомпрессоров автомобильных ДВС. Установка турбокомпрессора на автомобильном ДВС позволяет не только увеличить удельную мощность, но и существенно улучшить экономичность и экологичность двигателя за счет повышения эффективности сгорания топлива. Были рассмотрены существующие типы турбокомпрессоров. Также, в качестве примера, в статье выполнен обзор перспективных конструкций турбокомпрессоров производства фирмы BorgWarner, предназначенных для установки на бензиновые и дизельные ДВС. Детали агрегатов работают при высоких относительных скоростях вращения в условиях высоких температур и скоростей газов. В частности, при работе двигателя и после его останова турбина подвергается действию высоких температур, поэтому к материалам рабочего колеса и корпуса предъявляются высокие требования по физико-механическим свойствам.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, отработавшие газы, максимальная мощность, крутящий момент.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Конструкция и основные функции турбокомпрессора (ТК) не претерпели принципиальных изменений с момента его изобретения швейцарским инженером Альфредом Бюхи, предложившим принцип турбонаддува в 1905 году [1].

Турбокомпрессор, как и следует из его названия, состоит из турбины и компрессора, соединенных общим валом. Турбина, приводимая в действие отработавшими газами (ОГ), передает энергию вращения на компрессор.

В конструкции автомобильных ДВС наиболее распространены центробежные компрессоры (рис. 1а) с радиально-осевыми (центростремительными) или осевыми газовыми турбинами (рис. 1б), которые и являются основой большинства современных ТК.



Савенков
Никита Владимирович



Сергеев
Никита Витальевич

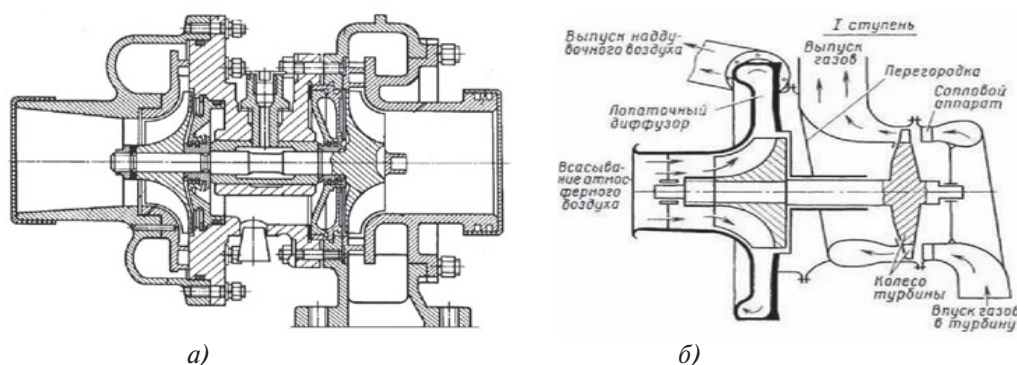


Рис. 1. Схемы турбокомпрессоров с радиальной центростремительной (а) и осевой (б) газовыми турбинами

В настоящее время турбокомпрессоры для автомобильных двигателей выпускаются многими зарубежными производителями. Один из крупнейших производителей – фирма Garrett (подразделение концерна Honeywell).

Преимущество применения турбонаддува на дизелях обусловлено возможностью увеличения их литровой мощности до уровня бензиновых двигателей. При этом дизели с наддувом развивают больший крутящий момент, что способствует

улучшению разгонной динамики автомобиля и позволяет реже переключать передачи. Существует устаревшее представление об относительно худших предельно реализуемых величинах ускорений автомобиля с дизельным ДВС и его повышенной дымности [2]. Отчасти это связано с применявшимися ранее двигателями без наддува, топливные насосы высокого давления (ТНВД) которых подавали топливо под относительно низким давлением, а его дозирование осуществлялось с помощью механических средств. Современные дизели оснащаются аккумуляторными топливными системами (в частности, системой «Common Rail» фирмы Bosch). Эти системы обеспечивают впрыск топлива под давлением до 2 000 бар, подача топлива производится несколькими порциями, реализуется многостадийный впрыск – сначала впрыскивается небольшая предварительная доза топлива, а после ее сгорания подается основная доза, которая воспламеняется практически без задержки, называемой периодом индукции. В результате давление в цилиндре повышается относительно плавно, а характерный для дизеля шум мало отличается от шума бензинового двигателя.

Применение наддува на бензиновых двигателях ограничено возможностью возникновения детонации, поэтому приходится вводить средства противодействия, из которых наиболее часто применяются сниженные степени сжатия, охлаждение наддувочного воздуха и охлаждение смеси при испарении бензина, впрыскиваемого непосредственно в цилиндры двигателя. В таблице 1 приведены основные показатели трех близких по мощности 4-цилиндровых двигателей, устанавливаемых на серийные автомобили VW Passat.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Турбокомпрессоры можно условно разделить на следующие типы: одиночный нерегулируемый

турбокомпрессор; регулируемый турбокомпрессор (с помощью управляемого байпасного канала или регулируемого соплового аппарата); система с несколькими турбокомпрессорами, параллельный наддув (например, технология «Twin-Turbo»).

ОДИНОЧНЫЙ НЕРЕГУЛИРУЕМЫЙ ТУРБОКОМПРЕССОР

Данный тип турбокомпрессора (рис. 2) обладает определенными преимуществами перед остальными типами турбокомпрессоров, такими как простота конструкции, а вследствие этого – надежность агрегата и более низкая стоимость. Одиночный турбокомпрессор имеет также ряд недостатков: наличие «турбоямы» – это задержка увеличения мощности двигателя (недостаточная приемистость), которая имеет место при увеличении нагрузки на ДВС, который работает с относительно низкой частотой вращения коленчатого вала. К недостаткам относится также меньшая мощность на отдельных режимах работы ДВС по отношению к другим типами агрегатов турбонаддува [3].

ТУРБОКОМПРЕССОР С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ СОПЛОВОГО АППАРАТА

Повышенный запас крутящего момента двигателей с турбонаддувом достигается регулированием давления газов перед турбиной путем их перепуска через байпасный канал или изменением геометрии соплового аппарата. В последнем случае применяется обычно венец с поворотными лопатками. Следует отметить, что регулирование турбокомпрессора перепуском части газов в обход турбины приводит к определенным потерям их энергии и соответствующему снижению эффективности всей системы наддува.

Таблица 1.

Параметры двигателей автомобиля VW Passat

Показатели	Модель двигателя		
	2,0 FSI	1,8 TSI	2,0 TDI
Тип двигателя	С непосредственным впрыском бензина, без наддува	С непосредственным впрыском бензина и турбонаддувом	Дизель с системой Common Rail и турбонаддувом
Рабочий объем, см ³	1 984	1 798	1 968
Максимальная мощность, л. с., при частоте вращения, об/мин	150/6 000	160/5 000	170/4 200
Максимальный крутящий момент, Нм, при частоте вращения, об/мин	200/3 500	250/1 500-2 400	350/1 750-2 500
Средний расход топлива автомобиля л/100 км, л (в городском цикле)	8,7	7,6	5,8
Время разгона автомобиля до 100 км/ч, с	9,9	8,6	8,6
Максимальная скорость автомобиля, км/ч	209	222	223
Выбросы углекислого газа, г/км (в городском цикле)	208	180	153

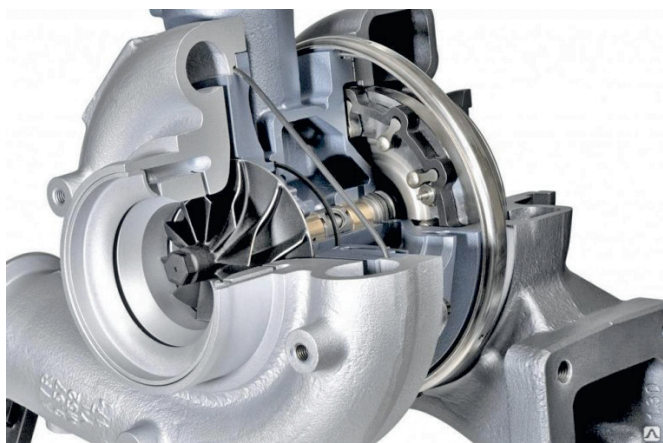


Рис. 2. Одиночный турбокомпрессор

БАЙПАСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НА ТУРБИННОЙ СТОРОНЕ

Установка байпасного клапана в турбинной части ТК – самый простой способ ограничения давления наддува. Геометрические параметры турбины выбирают таким образом, чтобы обеспечить требуемую характеристику крутящего момента при относительно невысокой частоте вращения коленчатого вала, необходимую для достижения заданных динамических показателей автомобиля [1]. При таком подходе к выбору конструктивных параметров ТК, по достижению максимального крутящего момента ДВС, на турбину уже начинает поступать избыточное количество отработавших газов. Таким образом, как только номинальное давление наддува достигнуто, избыток отработавших газов направляется по байпасному каналу в обход турбинного колеса. Управляющий клапан (анг. Wastegate), который открывает и закрывает байпасный канал, обычно приводится в действие пневматической камерой с подпружиненной диафрагмой, приводимой в движение давлением наддува. Так, по мере дальнейшего увеличения частоты вращения коленчатого вала двигателя, давление наддува остается на постоянном уровне. Рассмотренное решение регулируемой системы турбонаддува является достаточно экономичным в производственном отношении.

ИЗМЕНЯЕМАЯ ГЕОМЕТРИЯ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ

Байпасные системы регулирования управляют мощностью турбины, направляя часть отработавших газов (ОГ) в обход нее. Таким образом, «дармовая» энергия газов используется не полностью. Турбины с изменяемой геометрией (рис. 3) позволяют варьировать сечение проточной части турбины в зависимости от режима работы двигателя. Это дает возможность повысить долю утилизированной энергии ОГ за счёт обеспечения более рациональной формы канала, по которому ОГ попадают на турбинное колесо, для заданного нагрузочно-скоростного режима двигателя. Как результат, эффективность ТК и, соответственно, двигателя выше тех показателей, которые достигаются при байпасном регулировании.

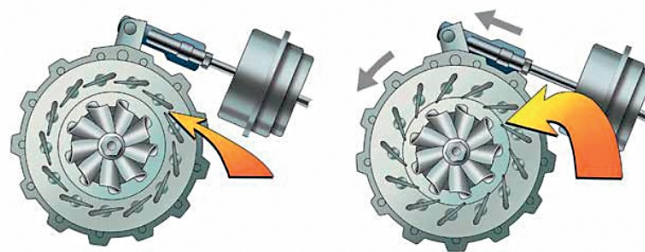


Рис. 3. Турбокомпрессор, оснащенный сопловым аппаратом с изменяемой геометрией

В настоящее время турбины с регулируемым сопловым аппаратом (РСА) и имеющие подвижные направляющие лопатки (VNT, VTG, VGT) являются наиболее передовым решением для современных легковых автомобилей с дизельным ДВС. В результате непрерывной адаптации проходного сечения турбинного канала к нагрузочно-скоростному режиму двигателя сокращаются потребление топлива, а также выбросы вредных веществ. Относительно невысокий крутящий момент создается уже при сравнительно невысокой частоте вращения коленчатого вала. Это в сочетании с рациональным алгоритмом управления сопловым аппаратом турбины обеспечивает существенное улучшение тягово-скоростных свойств автомобиля.

Современные конструкции имеют преимущественно пневмомеханический привод поворота лопаток, представляющий вакуумно-регулируемую камеру и пропорциональный клапан с электронным управлением. Очевидно, что в будущем все чаще будут применяться электромеханические приводы с положительной обратной связью, позволяющие реализовать точное и чрезвычайно гибкое управление давлением наддува.

СИСТЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО НАДДУВА

Данная система включает в себя турбокомпрессоры, которые работают одновременно, т.е. параллельно друг с другом (рис. 4). В настоящее время такая система (например, «TwinTurbo») в основном устанавливается на двигателях, к которым предъявляются требования по обеспечению высокой удельной мощности. Система «TwinTurbo» обеспечивает высокую производительность в широком диапазоне режимов. Такая система позволяет получить увеличение мощности при относительно небольших размерах и, соответственно, габаритах двигателя.

ТУРБОКОМПРЕССОРЫ ФИРМЫ BORGWARNER

Следуя современным тенденциям совершенствования автомобильных двигателей, фирма Honeywell разработала несколько конструкций малоразмерных компрессоров, в том числе для устанавливаемого на индийском автомобиле Tata Nano 2-цилиндрового двигателя рабочим объемом 0,8 л. Фирма BorgWarner производит малоразмерные турбокомпрессоры как для дизелей, так и для бензиновых двигателей. Кор-

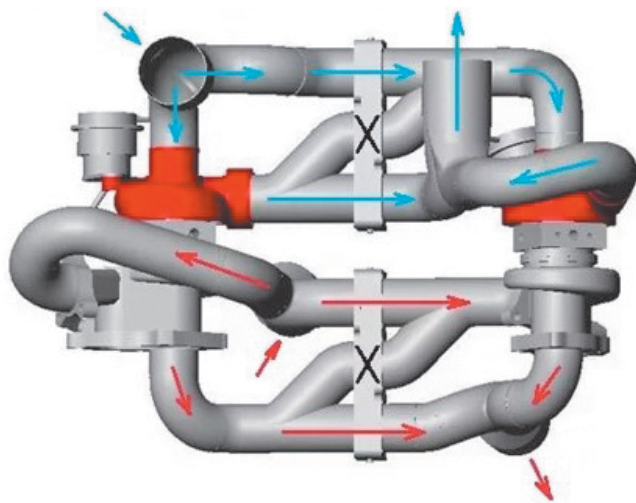


Рис. 4. Система параллельного наддува

пуса турбин этих ТК изготавливаются из специальной жаростойкой стали, а в средних корпусах с установленными в них подшипниками ротора предусмотрены полости, подключаемые к системе охлаждения двигателя. Фирма выпускает также ТК с корпусами, изготовленными штамповкой из листовой стали. Чтобы сократить время прогрева нейтрализатора, корпус турбины выполняют интегрированным с выпускным коллектором – в виде единой детали. В некоторых случаях применяются коллекторы и корпуса турбин с тепловыми экранами. Для дизелей мощностью от 50 до 130 л.с. изготавливаются турбокомпрессоры моделей KP31–K03 (Рис. 5а), для дизелей мощностью от 80 до 250 л.с. предназначены турбокомпрессоры моделей BV35–BV50. Регулирование агрегатов осуществляется с помощью перепускного клапана, оснащенного пневмомеханическим или электромеханическим приводом.

Некоторые из рассматриваемых ТК имеют охлаждаемый корпус подшипников, включаемый в контур системы охлаждения двигателя. Для дизелей мощностью от 130 до 350 л.с. фирма BorgWarner предлагает системы двухступенчатого наддува R2S с регулируемым перепуском газов между турбинами высокого и низкого давления (Рис. 5б).

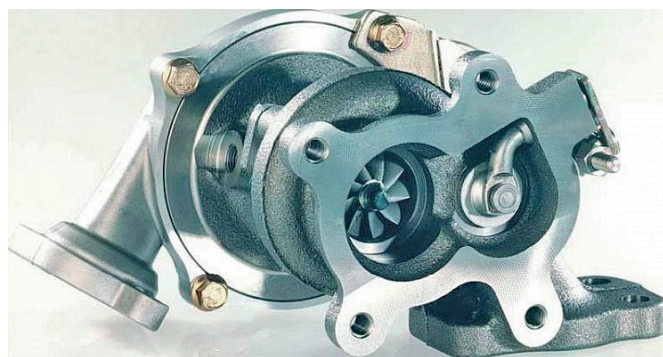
Одной из инновационных разработок данной фирмы является турбокомпрессор с двойной улиткой и поворотными лопатками соплового аппарата

турбины. Применение двух улиток в сочетании с раздельными выпускными коллекторами способствует сохранению кинетической энергии выходящих из цилиндров газов, что позволяет повысить энергетическую эффективность турбокомпрессора при низких и средних частотах вращения коленчатого вала двигателя. При этом также улучшается динамика разгона вала турбокомпрессора при резкой подаче нагрузки на ДВС. Для бензиновых двигателей мощностью от 60 до 340 л.с. разработаны турбокомпрессоры моделей VO31–VO53 с перепускным клапаном, а также модели VO45–VO53 со сдвоенной улиткой. ТК с изменяемой геометрией соплового аппарата турбины выпускаются для двигателей мощностью от 160 до 220 л.с. Стоит отметить, что турбокомпрессоры для бензиновых двигателей рассчитаны на работу при температуре отработавших газов до 1 050 °С. Благодаря этому отсутствует необходимость в охлаждении смеси за счет ее переобогащения. В результате при работе двигателя с большой нагрузкой возможна экономия топлива до 20 %.

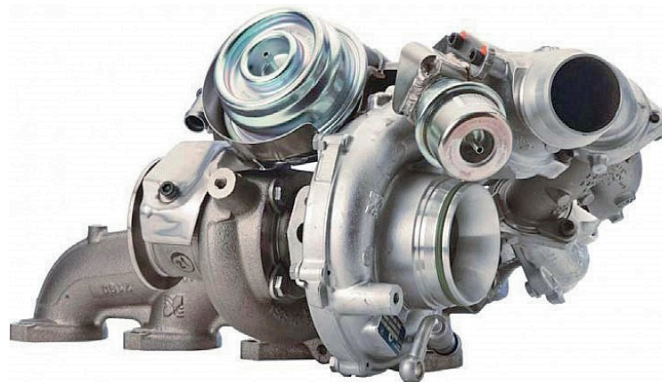
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Поскольку при работе двигателя и после его останова турбина подвергается действию высоких температур, колесо и корпус изготавливаются из материалов, обладающих высокой жаропрочностью. В общем случае крыльчатки турбин изготавливают из сплавов на основе никеля, таких как Inconel 713 и GMR 235. Основные компоненты этих сплавов – никель и хром. В то время как GMR 235 работает в условиях температуры отработавших газов (ОГ) на входе в турбину до 850 °С, Inconel 713 (73 % никеля, 13 % хрома) применяется при температурах свыше 1 000 °С.

Выбор материала для корпуса турбины также зависит от температуры. В настоящее время серый чугун GGG40 со сферическим графитом (до 680 °С) применяется реже. Для большинства ТК, предназначенных для дизельных ДВС, используется кремнево-молибденовый чугун GGG SiMo 5.1 (до 760 °С) или GGV SiMo 4.5 0.6 (до 850 °С). Реже для температур ОГ до 850 °С используется высоколегированный никель-хромовый чугун GGG NiCrSi 20 2 2 (Niresist D2).



а)



б)

Рис. 5. Турбокомпрессоры фирмы BorgWarner:
а) модель KP; б) агрегат двухступенчатого наддува R2S

В большинстве турбокомпрессоров для бензиновых двигателей с температурами ОГ до 970 °С применяется сплав GGG NiCrSi 35 5 2 (Niresist D5). Для самых высоких температур, до 1 050 °С (такие условия прогнозируются для бензиновых двигателей ближайшего будущего [1]), применяется жаростойкая литейная аустенитная сталь.

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение турбокомпрессоров в автомобильных ДВС обуславливает значительное повышение удельной мощности, экономичности и экологичности двигателя по отношению к ДВС без наддува. Также применение турбокомпрессоров в дизельных ДВС имеет преимущество над бензиновыми ДВС. Дизельные двигатели с турбонаддувом могут иметь больший крутящий момент с такой же литровой мощностью, что было приведено в табл. 1.

Из рассмотренных турбокомпрессоров, предлагаемых фирмой BorgWarner, можно сделать вывод, что технологии производства турбокомпрессоров совершенствуются и направлены на улучшение производительности автомобильных ДВС. Следует отметить, что в настоящее время уделяется также большое внимание и материалам для изготовления корпусов и прочих деталей турбокомпрессоров, которые способны выдерживать большие температурные нагрузки.

Список литературы

1. turbomaster.ru: [сайт]. Турбоинфо / Справочные материалы / Конструкция турбины – 2015 г. – URL: <https://turbomaster.ru/article/construction> - Текст: электронный.
2. abs-magazine.ru: [сайт]. Турбокомпрессоры для бензиновых двигателей - журнал «АБС – авто». – Изд. с 1997г. –

URL: <https://abs-magazine.ru/article/turbokompressori-dlya-benzinovyh-dvigatelay> - Текст: электронный.

3. Петросяни, А. И. Анализ турбокомпрессоров для использования в составе ДВС / А. И. Петросяни, А. В. Сидоренко // Мавлютовские чтения : материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции: в 6 томах, Уфа, 25–27 октября 2022 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 515-520.
4. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н. С. Ханнин, Э. В. Аболтин, Б. Ф. Лямцев, Е. Н. Зайченко, Л. С. Аршинов. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с. – Текст: непосредственный.
5. Горожанкин, С. А., Расчет двигателей внутреннего сгорания: расчет агрегатов турбонаддува: учебно-методическое пособие для студентов направлений подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков; ФГБОУ ВО «ДОННАСА». – Макеевка, 2023. – 76 с. – Текст: непосредственный.
6. Методические указания к выполнению теплового расчета ДВС в курсовых и дипломных проектах и работах (для студентов направлений подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» очной и заочной форм обучения) / Сост.: С. А. Горожанкин, А. В. Чухаркин, Н. В. Савенков. – Макеевка: ДонНАСА, 2019. – 59 с. – Текст: непосредственный.
7. Turbocharging the Internal Combustion Engine / Edited by N. Watson, M. S. Janota – THE MACMILLAN PRESS LTD London and Basingstoke, 1982. – 624 p. – ISBN 978-1-349-04026-1, ISBN 978-1-349-04024-7 (eBook). – Текст: непосредственный.