

В. Л. Химич, Д. В. Епифанов

ВЫБОР СИСТЕМЫ НАДДУВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТРЕБОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ И УРОВНЯ ФОРСИРОВАНИЯ БЫСТРОХОДНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

Показано, как с развитием европейских экологических стандартов меняются требования к характеристикам систем наддува дизелей. Приведено краткое описание существующих и перспективных систем наддува. Дана сравнительная оценка по улучшению характеристик дизеля и динамических качеств автомобиля в зависимости от используемой системы наддува. *Турбонаддув; экологический стандарт; дизель; регулируемый турбокомпрессор; уровень форсирования*

С целью снижения техногенного воздействия на окружающую среду в Европе для автомобильного транспорта разработаны экологические стандарты.

Евро 0 – с 1982 года нормирует эмиссии оксидов азота (NO_x), углеводородов (HC), монооксида углерода (CO) и дымности (K) отработавших газов.

Евро 1 – Евро 5 – с 1992 года дополнительно нормируют дисперсные частицы (PM).

Евро 6 – с 2014 года дополнительно нормируют эмиссии диоксида углерода (CO_2).

В составе силовой установки автотранспортного средства дизель завоевал ведущее место благодаря высокой топливной экономичности, низкой токсичности отработавших газов (ОГ) и широким возможностям по уровню форсирования мощности с применением различных систем наддува.

В данной статье рассмотрены особенности систем наддува дизелей, устанавливаемых на автотранспортные средства с максимальной массой до 3,5 т, эмиссии вредных веществ которых определяют по Правилам ЕЭК ООН № 83 [1].

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ТУРБОНАДДУВА ДИЗЕЛЕЙ ДО 2000 ГОДА

Рассмотрим особенности развития систем турбонаддува дизелей с рабочим объемом 1,9 л фирмы Volkswagen, применяемых на автомобилях Golf, по мере развития Европейских экологических стандартов от Евро 0 до Евро 3.

На рис. 1 приведены внешние скоростные характеристики (BCX) по абсолютному давлению наддува дизелей с системами одноступенчатого турбонаддува с регулируемыми турбокомпрессорами:

- с клапаном перепуска части ОГ, минуя турбину (BCX 1, 2);

- с регулируемым сопловым аппаратом турбины (BCX 3 – 5).

Анализ BCX 1 – 5 показывает, что данные турбокомпрессоры обеспечивают:

- максимальное повышение давления наддува в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 1000 до 2000 мин^{-1} ;

- поддержание максимального давления наддува $p_{k,\text{max}}$ в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 2000 до 4000 мин^{-1} ;

- увеличение максимального давления наддува $p_{k,\text{max}}$ от 1,8 до 2,5 Бар по мере перехода от Евро 0 к Евро 3, при этом литровая мощность дизелей возрастает от 34,7 до 57,9 кВт/л.

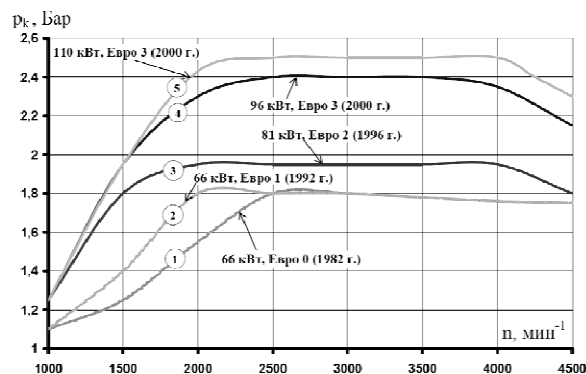


Рис. 1. BCX по абсолютному давлению наддува p_k дизелей с рабочим объемом 1,9 л фирмы Volkswagen [2]

При уровне форсирования дизелей фирмы Volkswagen более 42 кВт/л в системах одноступенчатого турбонаддува потребовалось применение турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратом турбины для выполнения экологических стандартов Евро 2, 3.

Дальнейшее развитие экологических стандартов привело к совершенствованию одноступенчатого турбонаддува.

пенчатых систем турбонаддува и разработке двухступенчатых систем наддува для дизелей Евро 4 – 6 с сохранением вышеотмеченных тенденций.

ОДНОСТУПЕНЧАТЫЕ СИСТЕМЫ ТУРБОНАДДУВА

В одноступенчатых системах турбонаддува сжатие воздуха выполняется с помощью одного центробежного компрессора с приводом от газовой турбины (ТКР).

Различают нерегулируемые и регулируемые ТКР.

В регулируемых ТКР предусмотрены дополнительные конструктивные устройства для изменения скорости ОГ на входе в колесо газовой турбины или скорости воздуха на выходе из колеса центробежного компрессора.

В автомобильных дизелях наиболее широко применяются:

- ТКР WGT (с клапаном перепуска части ОГ, минуя турбину);
- ТКР с PCA (с регулируемым сопловым аппаратом турбины);
- ТКР VST (с дросселированием турбины).

ТКР WGT

Схема работы ТКР WGT приведена на рис. 2.

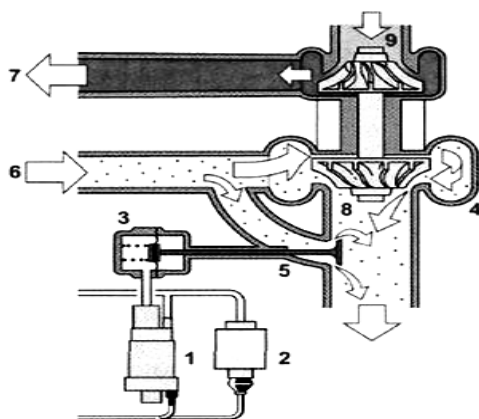


Рис. 2. Устройство и схема работы ТКР WGT [3]:

- 1 – электропневматический преобразователь давления наддува; 2 – вакуумный насос; 3 – исполнительный механизм перепускного клапана; 4 – корпус турбины; 5 – перепускной клапан; 6 – канал подачи ОГ к турбине; 7 – канал подачи сжатого воздуха во впускной тракт дизеля; 8 – колесо турбины; 9 – колесо компрессора

К достоинствам ТКР WGT относятся:

- простота регулирования давления наддува с помощью клапана перепуска части ОГ, минуя турбину;
- поддержание максимального давления наддува на заданном уровне в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 2000 до 4500 мин⁻¹ (см. рис. 1).

К недостаткам ТКР WGT относятся:

- необходимость перепуска высокоэнтальпийных ОГ в атмосферу, минуя турбину для поддержания $p_{k,max}$ на заданном уровне, после режима максимального крутящего момента дизеля, что приводит к ухудшению экономичности и увеличению эмиссии вредных веществ с ОГ;
- наличие «турбопровала» на переходных режимах работы дизеля.

ТКР с PCA

К достоинствам ТКР с PCA по сравнению с ТКР WGT относятся:

- отсутствие перепуска высокоэнтальпийных ОГ в атмосферу, минуя турбину, что приводит к повышению экономичности и снижению эмиссии вредных веществ с ОГ;
 - отсутствие «турбопровала» на переходных режимах работы дизеля;
 - повышение максимального давления наддува $p_{k,max}$ до 2,5 Бар при одновременном повышении топливной экономичности дизеля;
 - возможность гибкого управления давлением наддува на любых режимах работы дизеля.
- К недостаткам ТКР с PCA по сравнению с ТКР WGT относятся:
- более сложное конструктивное исполнение;
 - необходимость электронного управления с обратной связью.

Применение ТКР с PCA на дизелях с рабочим объемом более 1,4 л позволяет повысить уровень крутящих моментов по ВСХ при низких частотах вращения коленчатого вала, что приводит к повышению динамических качеств автомобиля, снижению эксплуатационного расхода топлива и количества эмиссий вредных веществ с ОГ (см. рис. 3).

В качестве примера ТКР с PCA на рис. 4 приведено устройство и схема работы ТКР с поворотными лопатками соплового аппарата турбины.

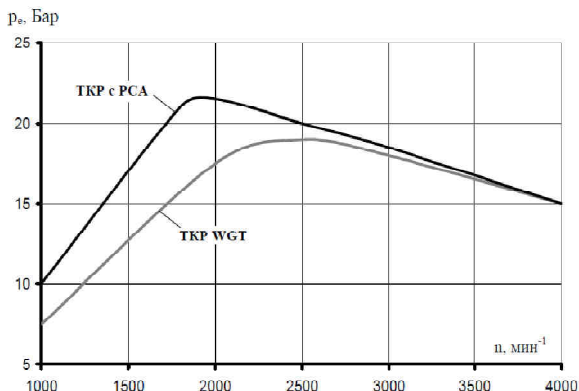


Рис. 3. ВСХ по среднему эффективному давлению дизеля с одинаковой номинальной мощностью, оснащенного ТКР WGT и ТКР с PCA [4]

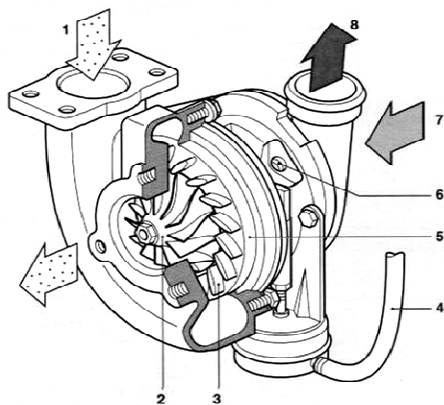


Рис. 4. Устройство и схема работы ТКР с поворотными лопатками соплового аппарата турбины [3]: 1 – канал подачи ОГ; 2 – колесо турбины; 3 – поворотная лопатка соплового аппарата турбины; 4 – шланг подачи разрежения; 5 – кольцо для поворота лопаток соплового аппарата турбины; 6 – отверстие для подачи масла; 7 – подача воздуха к компрессорной ступени; 8 – подача сжатого воздуха к двигателю

ТКР VST

ТКР VST является вариантом исполнения ТКР с PCA, который специально разработан для дизелей с рабочим объемом менее 1,4 л.

Устройство турбинной ступени ТКР VST приведено на рис. 7.

Принцип работы ТКР VST заключается в открытии подводного канала 3 регулирующей заслонкой 4, которая увеличивает проходное сечение улитки корпуса турбины и, соответственно, расход ОГ через колесо турбины.

При низких частотах вращения коленчатого вала или малых нагрузках ОГ поступает в колесо турбины только через улитку корпуса турбины 2 с малым поперечным сечением. Это повышает

скорость течения ОГ и обеспечивает высокое давление наддува. При достижении заданного давления наддува регулирующая заслонка 4 открывает подводной канал 3. Скорость течения ОГ уменьшается, что приводит к стабилизации давления наддува.

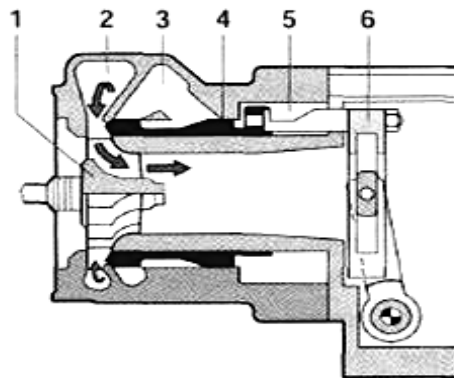


Рис. 5. Турбинная ступень ТКР VST [3]: 1 – колесо турбины; 2 – улитка корпуса турбины; 3 – подводной канал; 4 – регулирующая заслонка; 5 – перепускной канал; 6 – тяга управления заслонкой

Конструкция регулирующей заслонки 4 позволяет перепускать часть ОГ, минуя турбину, через перепускной канал 5 при необходимости [3, 5].

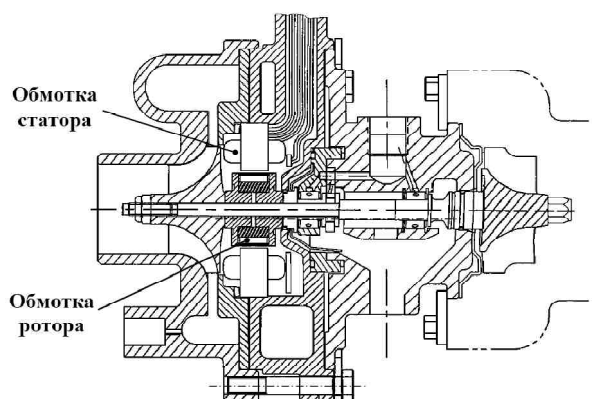
ТКР С ВСТРОЕННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Обмотка ротора встроенного электродвигателя размещена на роторе ТКР со стороны колеса компрессора. Обмотка статора встроенного электродвигателя размещена в неподвижной проставке между корпусом компрессора и корпусом подшипников скольжения ТКР (см. рис. 6, а).

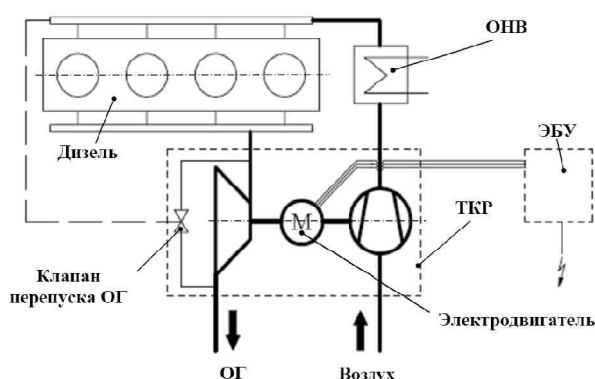
Применение встроенного электродвигателя на всех типах ТКР позволяет получить максимально возможные давления наддува по ВСХ сразу после режима холостого хода, при этом величина давления наддува ограничивается линией помпажа.

Кроме того, применение встроенного электродвигателя позволяет устранить «турбопровал» на ТКР WGT и нерегулируемых ТКР.

Фирма Honeywell-Garrett разработала аналогичную конструкцию ТКР «e-Turbo», которая за счет энергии ОГ позволяет использовать встроенный электродвигатель в качестве генератора [6].



а



б

Рис. 6. ТКР с встроенным электродвигателем «eu-ATL» фирмы Borg Warner Turbo System (BWTS):
а – продольный разрез ТКР [5];
б – схема соединения ТКР с двигателем [4]

СИСТЕМА ТУРБОНАДУВА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА ДВУМЯ ТКР

На рис. 7 приведена схема системы турбонадува с параллельной подачей воздуха с помощью двух ТКР, разработанная специалистами фирм Honeywell – Garrett и PSA.

Данная система турбонадува состоит из двух малоразмерных ТКР1 и ТКР2 фирмы Honeywell – Garrett и трех управляющих клапанов 1, 2 и 3.

ТКР1 – регулируемый ТКР WGT (модель GT1446S) имеет более высокую производительность, по сравнению с ТКР2.

ТКР2 – нерегулируемый ТКР (модель GT1238), подключается параллельно к ТКР1 с помощью клапанов 2 и 3 по мере необходимости. Байпасный клапан 1 обеспечивает циркуляцию воздуха через компрессорную ступень ТКР2 с целью минимизации утечек смазочного

масла через уплотнения подшипникового узла на переходных режимах, когда клапан 3 открыт, а клапан 2 закрыт, а сжатый воздух от ТКР2 не поступает в двигатель.

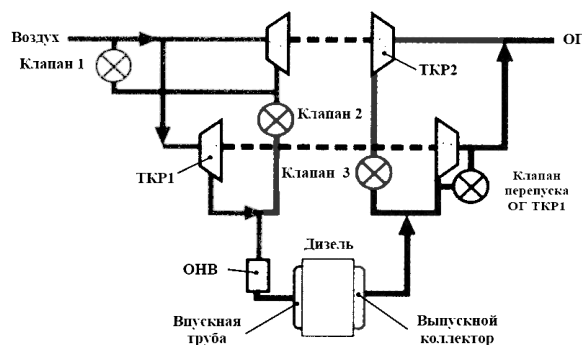


Рис. 7. Схема системы параллельной подачи воздуха с помощью двух ТКР четырехцилиндрового дизеля с рабочим объемом $iV_h=2,2$ л ($N_e = 125$ кВт / 4000 мин⁻¹, Евро 4) [7]

Данная система турбонадува позволяет дизелю при $iV_h = 2,2$ л развивать по ВСХ крутящий момент 330 Н·м при частоте вращения коленчатого вала 1300 мин⁻¹ и достигать максимального крутящего момента, равного 370 Н·м, при 1500 мин⁻¹.

В диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля от 2600 до 3200 мин⁻¹ клапан 3 обеспечивает подачу ОГ в турбинную ступень ТКР2. При этом клапан 1 обеспечивает перепуск сжатого воздуха на вход в компрессорную ступень ТКР2. Начиная с 3200 мин⁻¹ клапан 1 закрывается, а клапан 2 открывается, обеспечивая подачу сжатого воздуха на впуск дизеля параллельно ТКР1.

Дальнейшим развитием системы параллельной подачи воздуха с помощью двух ТКР является система турбонадува V-образного дизеля AJ-V6D Gen III фирмы Ягуар, в которой ТКР1 выполнен в виде регулируемого ТКР с РСА. При $iV_h = 3,0$ л литровая мощность дизеля увеличена с 56,8 до 67,3 кВт/л, достигнут максимальный крутящий момент 600 Нм при 1500 мин⁻¹ и выполнены нормы Евро 5 [8].

Основным недостатком одноступенчатых систем турбонадува является ограничение линией помпажа требуемого максимального давления наддува в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 1000 до 2000 мин⁻¹. Поэтому для выполнения экологических стандартов Евро 4 – 6 многие фирмы применяют двухступенчатые системы наддува.

ДВУХСТУПЕНЧАТЫЕ СИСТЕМЫ НАДДУВА

В системах двухступенчатого наддува сжатие воздуха выполняется последовательно с помощью двух центробежных компрессоров, привод одного из которых может быть выполнен от электродвигателя.

СИСТЕМА ТУРБОНАДДУВА R2S™

На рис. 8 приведена схема системы R2S™, разработанной специалистами фирмы Borg Warner Turbo System (BWTS) и BMW.

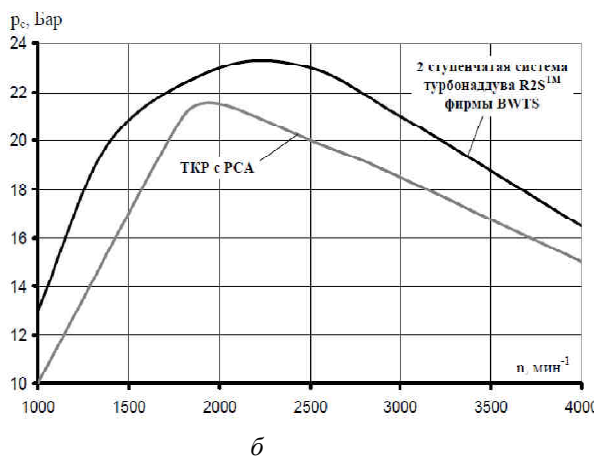
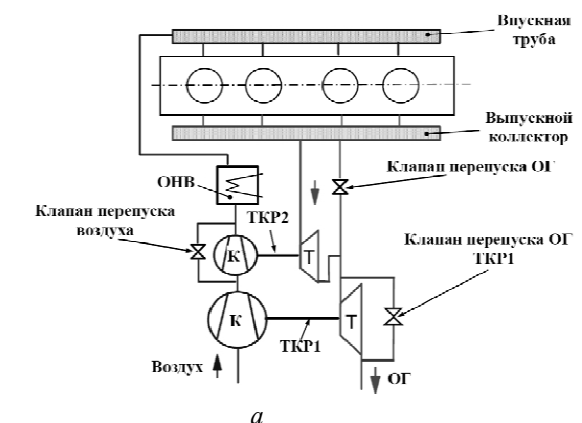


Рис. 8. Система двухступенчатого наддува:
a – схема системы двухступенчатого турбонаддува R2S™ для дизеля OM651 ($iV_h=2,2$ л; Евро 5);
б – сравнение ВСХ по среднему эффективному давлению дизеля OM651 с двухступенчатой и с одноступенчатой системами турбонаддува [4]

Система R2S™ включает два ТКР фирмы BWTS и два перепускных клапана.

ТКР1, регулируемый ТКР WGT ступени низкого давления, и ТКР2, нерегулируемый ТКР ступени высокого давления, работают одновременно. Клапаны перепуска воздуха и ОГ регулируют давление наддува (см. рис. 8, *a*).

Применение системы R2S™ вместо ТКР с РСА при постоянном рабочем объеме позволяет существенно увеличить среднее эффективное давление дизеля по всей ВСХ (см. рис. 8, *б*).

Это достигается за счет применения ТКР2 с высоким значением степени повышения давления π_k и к.п.д. компрессорной ступени при низких расходах воздуха, когда дизель работает в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 1000 до 2000 мин^{-1} .

ТКР1 обеспечивает высокие значения π_k и высокие к.п.д. компрессорной ступени при больших расходах воздуха, когда дизель работает в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 2000 до 4000 мин^{-1} (см. рис. 9).

Дальнейшее повышение крутящего момента достигается в системе R2S™ при использовании в качестве ТКР2 регулируемого ТКР с РСА [10].

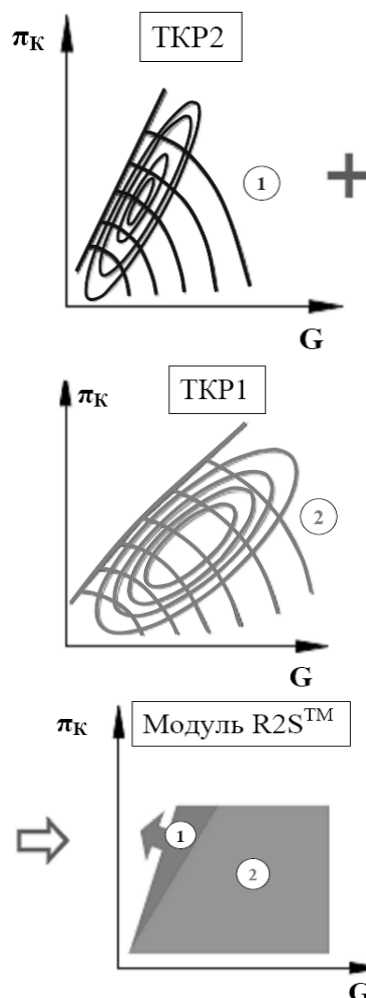


Рис. 9. Схема получения объединенной расходно-напорной характеристики с помощью системы турбонаддува R2S™ [9]: 1 – характеристика компрессорной ступени ТКР2; 2 – характеристика компрессорной ступени ТКР1

СИСТЕМА НАДДУВА EBOOSTER™

На рис. 10 приведена схема системы наддува eBooster™, разработанной специалистами фирмы Borg Warner Turbo System (BWTS) и BMW.

Данная система наддува включает регулируемый ТКР WGT перепуска воздуха, минуя компрессорную ступень, и компрессор eBooster™ с электроприводом (см. рис. 10, а).

Компрессор eBooster™ с электроприводом позволяет дизелю развивать более высокие значения крутящих моментов по ВСХ при низких частотах вращения коленчатого вала как на установившихся, так и на переходных режимах (см. рис. 11).

При работе дизеля на частотах более 2000 мин⁻¹ компрессор eBooster™ отключается.

Основным преимуществом компрессора eBooster™ является электропривод, который позволяет получить высокие значения π_k при высоких КПД компрессорной ступени на любых режимах работы дизеля при частотах менее 2000 мин⁻¹.

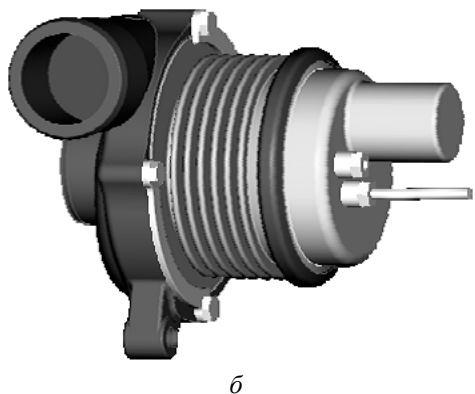
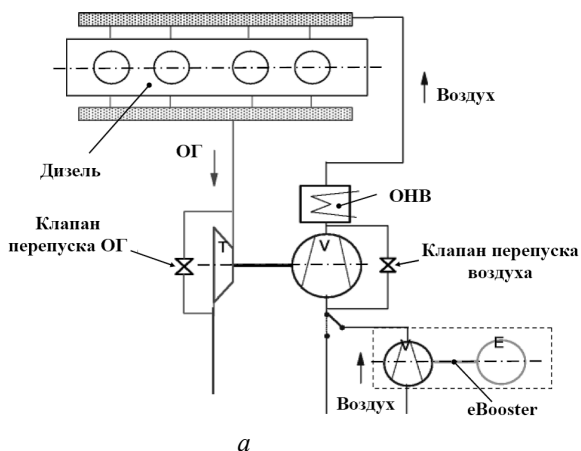


Рис. 10. Система наддува eBooster™: а – схема системы наддува eBooster™; б – внешний вид компрессора eBooster™ с электроприводом [11]

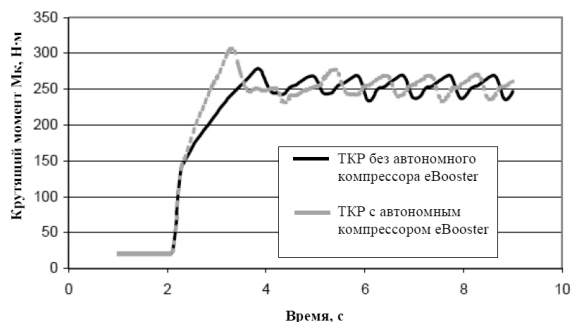


Рис. 11. Динамика изменения крутящего момента дизеля при повышении нагрузки при постоянной частоте вращения коленчатого вала, равной 2000 мин⁻¹ [11]

СИСТЕМА НАДДУВА ECHARGER™

Данная система наддува, как аналог системы eBooster™, разработана специалистами фирмы Honeywell-Garrett (США) [12].

СИСТЕМА НАДДУВА TURBODYNE TURBOFLOW™

Данная система наддува разработана специалистами фирмы Turbodyne Technologies Inc. (США).

От системы eBooster™ она отличается тем, что может работать как совместно с ТКР, так и в качестве основного агрегата наддува [13].

СИСТЕМА НАДДУВА VTES™

Данная система наддува разработана специалистами фирмы Controlled Power Technologies (Великобритания). Её отличительной особенностью по сравнению с системой eBooster™ является компрессор с электромагнитным двигателем, обеспечивающий высокую скорость нарастания давления перед ТКР WGT [14].

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СИСТЕМ НАДДУВА

Для рационального выбора системы наддува дизеля в зависимости от требований, предъявляемых к автомобилю, целесообразно выполнить оценку потенциала рассмотренных выше систем наддува.

На рис. 12 приведены ВСХ дизелей с различными системами наддува в зависимости от уровня форсирования (литровой мощности).

В таблице приведены параметры для сравнительной оценки потенциальных возможностей дизеля и динамических качеств автомобиля в зависимости от типа используемой системы наддува.

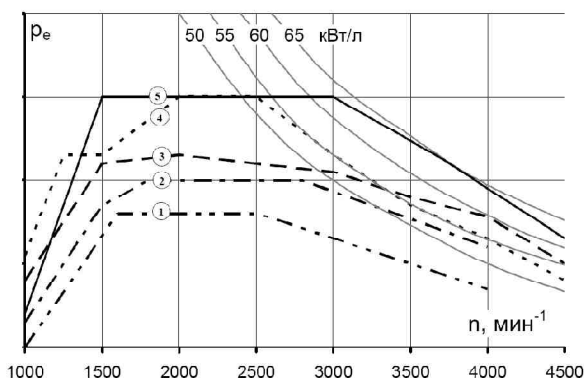


Рис. 12. ВСХ по среднему эффективному давлению дизелей с различным уровнем форсирования [15]: 1 – с одноступенчатой системой турбонадува (ТКР с РСА, настройка на режим номинальной мощности); 2 – с одноступенчатой системой турбонадува (ТКР с РСА, настройка на получение высокой литровой мощности); 3 – с одноступенчатой системой турбонадува (система турбонадува с параллельной подачей воздуха двумя ТКР фирмы Honeywell-Garrett); 4 – с двухступенчатой системой наддува eBooster™; 5 – с двухступенчатой системой турбонадува R2S™

Параметры дизеля и автомобиля [4]

Тип системы наддува	Параметры:			
	дизеля		автомобилia	
	Подъем ВСХ по P_e	Крутящий момент при $n=1000$ мин ⁻¹	Время разгона от 0 до 100 км/ч	Эластичность (60–100) км/ч (80–120) км/ч
Одноступенчатая система турбонадува с ТКР WGT	o	o	o	o
Одноступенчатая система турбонадува с ТКР с	o	o	+	+
Одноступенчатая система турбонадува с ТКР с вспомогательным электродвигателем	o	+	+	++
Одноступенчатая система турбонадува с параллельной подачей воздуха двумя ТКР	o	o	++	++
Двухступенчатая система турбонадува R2S™	++	+	++	++
Двухступенчатая система наддува eBooster™	+	++	+	++

Примечание. Возможность для улучшения параметра: o – отсутствует; + – существует; ++ – максимальная

Анализ внешних скоростных характеристик, приведенных на рис. 3 и рис. 12, а также оценка качественного уровня параметров, приведенных в таблице, показывает, что:

- при заданных динамических качествах автомобилей, выполняющих экологические стандарты Евро 4–5, для дизелей с литровой мощностью до 60 кВт/л наиболее предпочтительными являются одноступенчатые системы турбонадува на базе ТКР с РСА;
- при заданных динамических качествах автомобилей, выполняющих экологические стандарты Евро 4–5, для дизелей с литровой мощностью более 60 кВт/л требуется применение двухступенчатых систем наддува;
- для повышения динамических качеств автомобиля и выполнения экологического стандарта Евро 6 для дизелей с литровой мощностью до 60 кВт/л наиболее предпочтительными являются двухступенчатые системы наддува на базе ТКР с РСА и eBooster™;
- для повышения динамических качеств автомобиля и выполнения экологического стандарта Евро 6 для дизелей с литровой мощностью более 60 кВт/л требуется применение двухступенчатой системы турбонадува R2S™.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук А. Д. Блинову за оказанное содействие при написании и редактировании данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН №83) Единые образные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей [Текст]. Введен в действие 09.03.2004г постановлением № 126-ст. Издание официальное. Москва. ИПК Изд-во стандартов, 2004.
- Dieter Neyer, Richard Dorenkamp, Pol Rottenkolber. 25 Jahre Dieselmotoren bei Volkswagen [Текст]. MTZ-2001, май.
- Системы управления дизельными двигателями. М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 480 с.
- Dr. Frank Schmitt, Dipl.-Ing. Hans-Peter Schmalzl, Dipl.-Ing. Patrick Descamps Neue Erkenntnisse bei der Entwicklung von Aufladesystemen für Pkw-Motoren. Feb.2003. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbos.bwauto.com/service/default.aspx?doctype=12>.
- Hoecker P., Pfluger F., Jaisle J. W.; Munz, S. Moderne Aufladekonzepte für PKW Dieselmotoren 7. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 28–29 September 2000. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье <http://www.turbos.bwauto.com/service/default.aspx?doctype=12>.

6. Электронно-поддерживаемый наддув // Автостроение за рубежом. 2004. С. 12–14.

7. Parallel-sequenzielle Bi-Turboaufladung // MTZ. 2006, сентябрь.

8. Jaguar Introduces New 3.0L Diesel for European Market [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.greencarcongress.com/2008/12/jaguar-introduc.html#more>.

9. **Dr. S. Munz, Dr. M. Schier, H. P. Schmalzl, Dr. Th. Bertolini.** Der eBooster Konzeption und Leistungsvermögen eines fortgeschrittenen elektrischen Aufladesystems. Sept. 2002. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbos.bwauto.com/service/default.aspx?doctype=12>.

10. Diesel Power: информ.-аналит. журн. TurboNews. The info magazine the BorgWarner Turbo & Emissions Systems. 2007, январь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbos.bwauto.com/service/default.aspx>.

11. **Dipl.-Ing. P.Hoecker, Dr. J.-W.Jaisle, Dr. S. Münz.** Der eBooster™ von BorgWarner Turbo Systems/Schlüsselkomponente eines neuen Aufladesystems für Pkw.Mai.2001. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbos.bwauto.com/service/default.aspx?doctype=12>.

12. Turbocharger aftermarket Honeywell-Garrett. Garrett variable geometry turbochargers. Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003. 32 p.

13. The TurboFlow™ for Automotive Applications [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.turbodyne.com/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=12.

14. Electric Supercharger Can Enable More Extreme, Cost-Effective Engine Downsizing [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.greencarcongress.com/2008/09/electric-superc.html>.

15. Charging System [Электронный ресурс].-Режим доступа: http://www.avl.com/wo/webobsession.servlet/go/encoded/YXBwPWJjbXMmcGFnZT12aWV3Jm5vZGVpZD00MDAwMzQ5OTM_3D.html

ОБ АВТОРАХ



Химич Владимир Леонидович, зав. каф. энергетическ. установок и тепл. двигателей НГТУ им. Р. Е. Алексева. Дипл. инж. по авиац. двиг. (КуАИ, 1962). Д-р техн. наук по газотурбинным двигателям (Ленинград, 1989). Иссл. в обл. транспортн. и стационарн. тепл. энерг. установок.



Епифанов Дмитрий Владимирович, асп. той же каф., инж.-констр. 1 кат. УГК ОАО «ЗМЗ». Дипл. инж. по ДВС (ВлГУ, 2000). Иссл. в обл. турбонаддува двигателей автомобилей, тестируемых на соответствие требованиям ГОСТ Р41.83-2004.