

УДК 621.432

*А.В. Грицюк, канд. техн. наук*

## ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАЛОЛИТРАЖНОГО ДИЗЕЛЯ

### Введение

Спецификой развития отечественного малолитражного дизелестроения является формирование единой базы для разработки перспективных конструкций дизелей широкого народнохозяйственного назначения. Научно-технический потенциал КП ХКБД и финансовая поддержка государства, позволили создать семейство малолитражных четырёхтактных рядных дизелей серии ДТА в 2-х, 3-х и 4-х цилиндровом исполнении одного типоразмера.

Известно, что создание нового типоразмера двигателей внутреннего сгорания требует даже у передовых зарубежных фирм 5-7 лет и затрат в сотни миллионов долларов [1]. КП ХКБД пришлось решать задачу создания отечественного малолитражного дизеля в те же сроки, но при меньшем финансировании в сотни раз. Задание на разработку семейства малолитражных тракторных дизелей было выдано в 1998 году, а уже в следующем году было получено задание на разработку автомобильных модификаций того же типоразмера. Для сокращения времени и средств на проектирование и подготовку производства было принято решение о создании малолитражных дизелей серии ДТА автотракторного назначения мощностью от 12,5 до 80 кВт с единой базой корпусных деталей и приводов механизмов, унифицированными цилиндро-поршневой группой и кривошипно-шатунным механизмом. Целью данной работы является раскрытие проблемы создания автомобильной модификации дизеля при сохранении унификации с тракторными модификациями того же типоразмера.

### Формулирование сути проблемы

В настоящее время двигателестроение России, Украины, Белоруссии имея производственные мощ-

ности действующих предприятий, значительно превышающие количественные потребности собственных рынков, не могут обеспечить двигателями многие объекты их применения из-за отсутствия в производстве новых современных моделей двигателей и возможности коренной модернизации существующих. Так, например, на автомобили ОАМО "Завод имени И.А. Лихачёва" (серии ЗИЛ-5301) устанавливаются модификации Минских тракторных дизелей серии Д-245, а на трактора ОАО "Харьковский тракторный завод" устанавливаются модификации автомобильных дизелей ОАО "Автодизель" (серии ЯМЗ-236) и ОАО "КамАЗ-Дизель" (серии КамАЗ-740). Инициатива такого применения двигателей исходит от разработчиков автомобилей и тракторов, а не дизелей. Это приводит к тому, что двигатели претерпевают лишь незначительные конструктивные изменения, относящиеся к компоновке и разработке переходных присоединительных устройств к объекту применения. Уточнение регулировок, формирование внешней характеристики, вопросы эксплуатационных показателей остаются без должного внимания разработчиков дизелей, что и вызывает недоверие потребителей к термину "автотракторные".

Основы создания отечественного малолитражного автомобильного дизеля связаны с реализацией концепции параллельной разработки унифицированных модификаций автомобильного и тракторного двигателей единого типоразмерного ряда.

### Решение проблемы

#### Сравнение характеристик автомобильной и тракторной модификаций дизелей

На рис. 1 представлены изменения основных показателей тракторного дизеля 4ДТА и автомобильного 4ДТНА1 по внешним характеристикам.

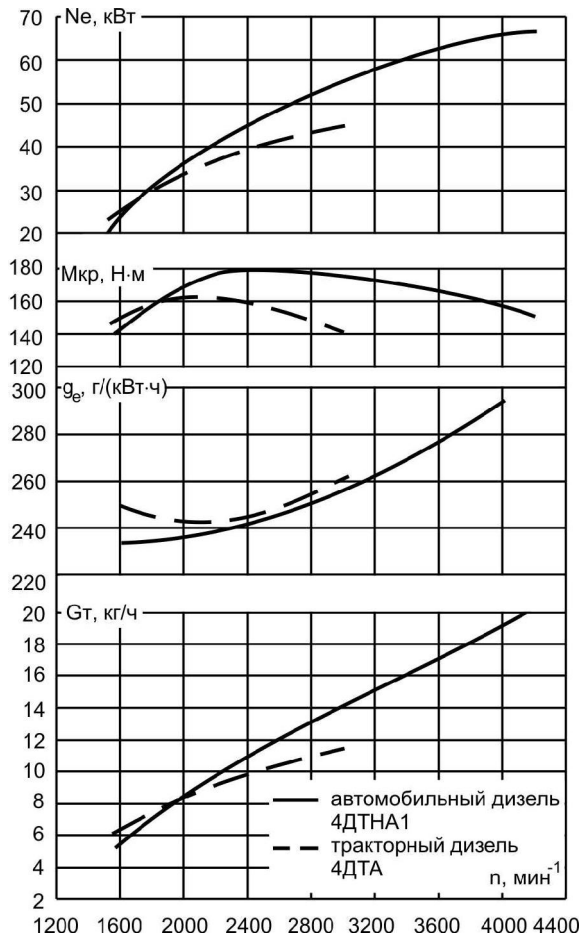


Рис. 1. Внешние характеристики малолитражных дизелей

Анализ зависимостей мощностей и крутящих моментов от частоты вращения коленчатого вала по внешним скоростным характеристикам показывает, что автомобильный дизель работает в более широком диапазоне частот вращения коленчатого вала. Для получения достаточно высоких мощностей дизели легковых и малотоннажных грузовых автомобилей выполняют высокооборотными. При одинаковых рабочих объемах для автомобильных дизелей характерно более высокое значение максимального крутящего момента с одновременным повышением общего коэффициента приспособляемости  $K_o$  [2], рассчитываемого по формуле:

$$K_o = K_m \cdot K_\omega, \quad (1)$$

где  $K_m$  – коэффициент приспособляемости по

крутящему моменту ( $K_m = M_{k_{max}} / M_{Ne}$ );  $K_\omega$  – коэффициент приспособляемости по угловой скорости коленчатого вала ( $K_\omega = \omega_{Ne} / \omega_{M_{k_{max}}}$ ).

Увеличение общего коэффициента приспособляемости позволяет улучшить приёмистость двигателя, сократить время разгона, уменьшить число ступеней коробки передач.

Особенности режимов эксплуатации позволяют форсировать автомобильный дизель в сравнении с тракторным дизелем. Это подтверждают внешние характеристики. По сравнению с дизелем 4ДТА (тракторная модификация) у автомобильного дизеля 4ДТНА1 номинальная частота вращения коленчатого вала выше на 40%, ( $3000 \text{ мин}^{-1}$  и  $4200 \text{ мин}^{-1}$ ), расширен скоростной диапазон частот вращения на 120% и увеличен крутящий момент дизеля во всём диапазоне частот вращения на 15-20%. Общий коэффициент приспособляемости  $K_o$  увеличен в 1,37 раза.

Для обеспечения таких показателей необходимо не только перерегулирование дизеля, но и существенные конструктивные изменения систем воздухообеспечения, топливоподачи, других узлов и элементов, влияющих на рабочий процесс и работоспособность дизеля.

### Обеспечение воздухообеспечения дизелей

Среднее эффективное давление находится в прямой функциональной зависимости от параметров, обеспечиваемых системами воздухообеспечения дизеля:

$$P_e = f(\eta_v, \rho_k, \eta_m), \quad (2)$$

где  $\eta_v$  – коэффициент наполнения;  $\rho_k$  – плотность воздушного заряда на впуске;  $\eta_m$  – механический КПД дизеля.

Увеличение значений этих параметров является актуальной и важной задачей разработчиков дизелей и зависит, главным образом, от характеристик агрегатов наддува и совершенства процессов газообмен-

на. При этом очистка и наполнение цилиндров воздухом зависит от проходного сечения газораспределительных органов и продолжительности их открытия (фаз газораспределения), а влияние воздухообеспечения на механический КПД дизеля характеризуется потерей мощности на насосные хода.

Тракторная и автомобильная модификации рассматриваемого дизеля оснащены агрегатами наддува.

Для тракторного дизеля в КП ХКБД разработан и изготовлен нерегулируемый ТКР6 с диаметрами компрессорного и турбинного колёс 62 мм и 68 мм соответственно и предельной частотой вращения ротора ( $n_{пр}$ ) 125000 мин<sup>-1</sup>.

Дизель 4ДТА разработан для универсального сельскохозяйственного трактора и имеет номинальную частоту вращения коленчатого вала 3000 мин<sup>-1</sup>. Основные эксплуатационные режимы его работы практически не отличаются от выполняющего аналогичные сельскохозяйственные и транспортные работы самоходного шасси с дизелем СМД-900 [3], имеющим такую же номинальную частоту вращения. Следовательно, около 84% времени эксплуатации тракторный дизель работает в диапазоне частот вращения 1700 - 2500 мин<sup>-1</sup>, из которых 43% при средней частоте вращения 2100 мин<sup>-1</sup>. Этому скоростному режиму работы двигателя и соответствует зона максимального КПД нерегулируемого турбокомпрессора (рис. 2).

Для обеспечения требований к протеканию внешней характеристики автомобильного дизеля на двигателе 4ДТНА1 установлен модернизированный по техническим требованиям КП ХКБД регулируемый турбокомпрессор ТКР5,5С-4 Воронежского механического завода с каналом перепуска части отработавших газов минуя турбину и предельной частотой вращения ротора 160000 мин<sup>-1</sup>.

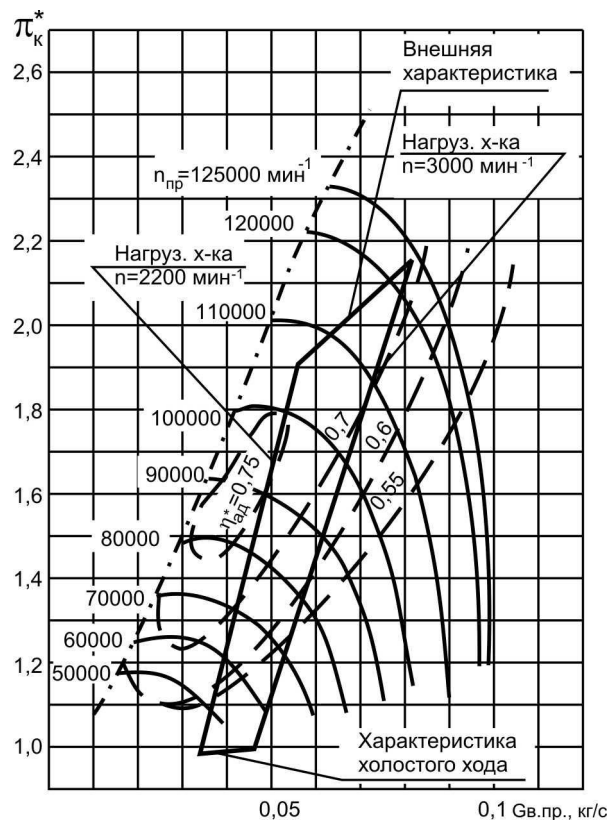


Рис. 2. Характеристика компрессора ТКР6 и поле его рабочих режимов в составе тракторного дизеля 4ДТА

Характеристики автомобильного ТКР существенно отличаются от тракторного и обеспечивают зоны максимального КПД турбокомпрессора в области эксплуатационных режимов автомобильного дизеля. Эти режимы определены по данным источника [4] и результатам реальной эксплуатации дизеля 4ДТНА1 в составе грузопассажирского автомобиля "Соболь". Эти данные показывают, что среднестатистические эксплуатационные режимы находятся в диапазоне эксплуатационных частот вращения 0,55-0,72  $n_{ном}$ , т.е. для дизеля 4ДТНА1 в диапазоне частот вращения 2300-3000 мин<sup>-1</sup>. Этим режимам работы дизеля и соответствует зона максимальных КПД модернизированного компрессора ТКР 5,5С-4 (рис. 4), что является существенным отличием от характеристик исходного (рис. 3) и тракторного (рис. 2) вариантов.

Кроме того, для дизелей легковых и грузопас-

сажирских автомобилей большое значение имеют динамические характеристики, которые существенно зависят от способности двигателя быстро выходить на требуемый уровень крутящего момента.

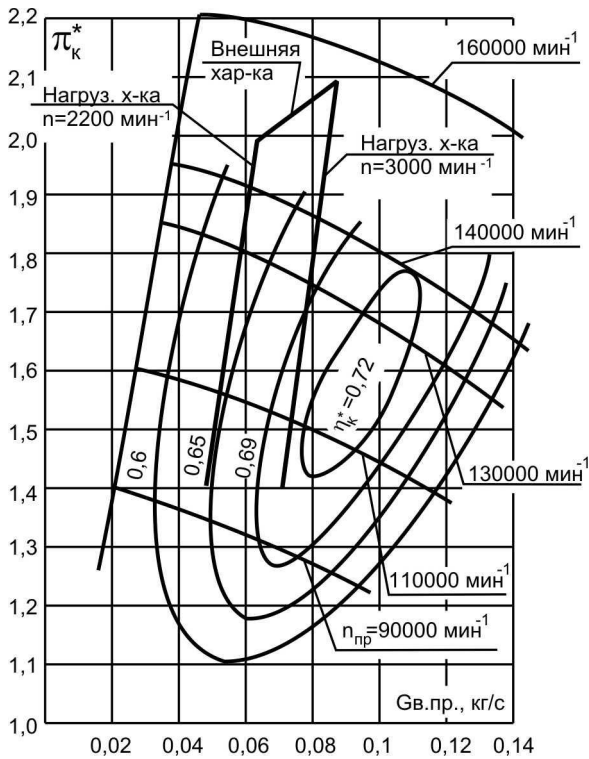


Рис. 3. Характеристика компрессора ТКР 5,5С-1 и поле его рабочих режимов в составе автомобильного дизеля 4ДТНА1

Чем больший крутящий момент способен развить двигатель за минимально возможное время при возрастании нагрузки, тем лучше динамические качества автомобиля. Это качество двигателя напрямую зависит от турбокомпрессора. Для повышения динамических качеств дизеля в газовом корпусе турбины турбокомпрессора предусмотрен начальный "разгонный" участок с зауженной до 3,11 см<sup>2</sup> площадью проходного сечения проточной части турбины. Вторым не менее существенным конструктивным мероприятием является уменьшение момента инерции ротора турбокомпрессора. ТКР 5,5С-4 имеет величину момента инерции ротора 0,2055·10<sup>-3</sup> кг·см·с<sup>2</sup>, в то время как у ТКР6 аналогичная величина составляет 0,7482·10<sup>-3</sup> кг·см·с<sup>2</sup>, т.е. в 3 раза больше.

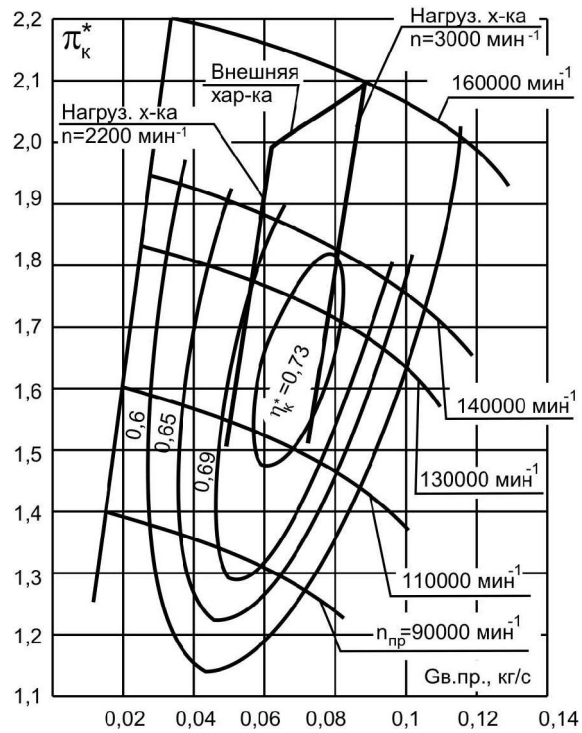


Рис. 4. Характеристика модернизированного компрессора ТКР 5,5С-4 и поле его рабочих режимов в составе автомобильного дизеля 4ДТНА1

Применение с целью формирования внешней характеристики на автомобильной модификации дизеля регулируемого турбокомпрессора неизбежно привело к увеличению противодавления выпуску и уменьшению отношения давления наддувочного воздуха ( $P_k$ ) к давлению газа перед турбиной ( $P_t$ ) при частотах вращения коленчатого вала выше частоты максимального крутящего момента. Экспериментальные данные отношений  $P_k/P_t$  на режимах внешних характеристик дизелей 4ДТА и 4ДТНА1 приведены в таблице 1.

Из табл. 1 видно, что у дизеля 4ДТНА1, с регулируемым турбокомпрессором, отношение  $P_k/P_t$  заметно ниже, чем у тракторного дизеля, что ведёт к снижению  $P_e$  из-за увеличения насосных потерь. Поэтому для улучшения показателей работы автомобильного дизеля 4ДТНА1 проведен **выбор рациональных фаз газораспределения и величины проходного сечения газораспределительных органов.**

В результате были разработаны и применены новые профили впускного и выпускного кулачков распределительного вала механизма газораспределения и

увеличен по сравнению с тракторным вариантом максимальный ход выпускного клапана (с 7,0 мм до 8,6 мм).

Таблица 1. Результаты измерений параметров газотурбинного наддува дизелей на режимах внешней характеристики

Частота вращения на режиме внешней характеристики, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Тракторный дизель 4ДТА (турбокомпрессор ТКР6)			Автомобильный дизель 4ДТНА1 (турбокомпрессор ТКР 5,5С-4)		
	$P_k$ , МПа	$P_t$ , МПа	$P_k/P_t$	$P_k$ , МПа	$P_t$ , МПа	$P_k/P_t$
2200	0,149	0,134	1,11	0,185	0,189	0,98
2600	0,164	0,150	1,09	0,193	0,200	0,96
3000	0,176	0,164	1,07	0,212	0,231	0,92
3600				0,215	0,256	0,84
4200				0,217	0,278	0,78

Отличие фаз газораспределения тракторного дизеля 4ДТА и автомобильного 4ДТНА1 показано в табл. 2.

Таблица 2. Фазы газораспределения малолитражного дизеля

Характеристика действия кулачка распределительного вала	Фазы газораспределения, град	
	Дизель 4ДТА	Дизель 4ДТНА1
Начало открытия впускного клапана, град. до ВМТ	20	10
Конец закрытия впускного клапана, град. после НМТ	48	38
Начало открытия выпускного клапана, град. до НМТ	70	70
Конец закрытия выпускного клапана, град. после ВМТ	22	10

Как видно из таблицы, в дизеле 4ДТНА1 с регулируемым турбокомпрессором потребовалось в два раза уменьшить перекрытие фаз открытия впускного клапана и закрытия выпускного клапана. Наряду с увеличением максимального хода впускного клапана это дало возможность уменьшить коэффициент остаточных газов  $\gamma_{ост}$  и увеличить коэффициент наполнения цилиндра, что благоприятно сказалось на росте  $P_e$ . Реализация рациональных фаз газораспределения и увеличенного максимального хода впускного клапана стала возможной в результате

разработки новой методики проектирования газораспределительных кулачков [5], применение которой позволяет достичь высоких значений время-сечений клапанов при выполнении имеющих место в малолитражном дизелестроении прочностных, конструктивных и технологических ограничений.

Тракторная и автомобильная модификации малолитражного отечественного дизеля оснащены однотипными, унифицированными в производстве, **системами топливоподачи**. Это системы непосредственного действия, разделенного типа с блочными четырехсекционными топливными насосами высокого давления с золотниковым управлением цикловой подачей и опережением впрыскивания. Впрыскивание топлива осуществляется форсунками закрытого типа с внутренним дренажом. Вместе с тем, в конструкциях форсунки и топливного насоса есть несущественные для производства, но значимые для эксплуатационных показателей дизелей конструктивные отличия. Так форсунка автомобильного дизеля 4ДТНА1 отличается от тракторной числом и расположением сопловых отверстий в распылителе. Распылитель тракторной форсунки имеет одно сопловое отверстие диаметром  $d_c=0,37$  мм, распылитель автомобильной форсунки - два сопловых отверстия равного диаметра  $d_c=0,35$  мм. Необходимость увеличения числа сопловых отверстий вызвана ростом про-

должительности впрыскивания топлива одноструйным распылителем с 18,5 град.п.кул.в. до 26,9 град.п.кул.в. при увеличении номинальной частоты вращения. Двухсопловые распылители в форсунках быстроходных вихрекамерных дизелей применялись и ранее [6], однако реализация этого мероприятия на дизеле 4ДТНА1 стала возможной после проведения экспериментального исследования по выбору диаметров и расположения сопловых отверстий распылителя. Эффективность различных вариантов распылителей оценивалась по изменению мощности ( $N_e$ ) и удельного эффективного расхода топлива ( $g_e$ ) при работе дизеля на режимах внешней характеристики. На рис.5 показана схема реализованного на дизеле 4ДТНА1 направления струй топлива относительно вращения вихря. Угол между струями составляет  $30^\circ$ .

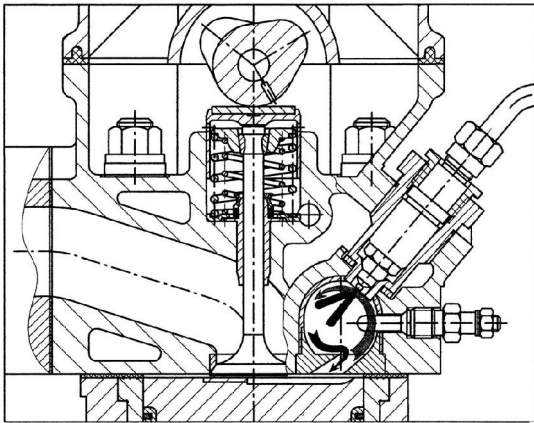


Рис. 5. Направления струй топлива относительно потока воздуха в вихревой камере сгорания дизеля 4ДТНА1

Эффективность организации дополнительного бокового впрыскивания топлива в сравнении с одноструйным распылителем показана в табл. 3.

Вторым отличием тракторной и автомобильной систем топливоподачи является конструкция регулятора, обеспечивающего требуемую характеристику подачи топлива при работе дизелей на режимах внешней характеристики (на рис. 6).

Таблица 3. Эффективность применения автомобильных форсунок с двухструйными распылителями

Направление бокового впрыска топлива	Частота вращения коленчатого вала, мин <sup>-1</sup>	Изменение эксплуатационных параметров дизеля 4ДТНА1	
		$\Delta N_e$ , кВт	$\Delta g_e$ , г/(кВт·ч)
По потоку воздуха в вихревой камере сгорания	3000	+1,33	-10,88
	4200	+2,21	-17,68
Против потока воздуха в вихревой камере сгорания	3000	-1,62	+13,60
	4200	-2,21	+19,04

Сравнение характеристик подтверждает несоответствие системы регулирования тракторного дизеля требованиям к росту цикловой подачи топлива для автомобильного дизеля при увеличении частоты вращения коленчатого вала с 3000 до 4200 мин<sup>-1</sup>. Поэтому система регулирования автомобильного дизеля 4ДТНА1 оборудована топливным корректором, уменьшающим цикловую подачу топлива при снижении частоты вращения коленчатого вала.

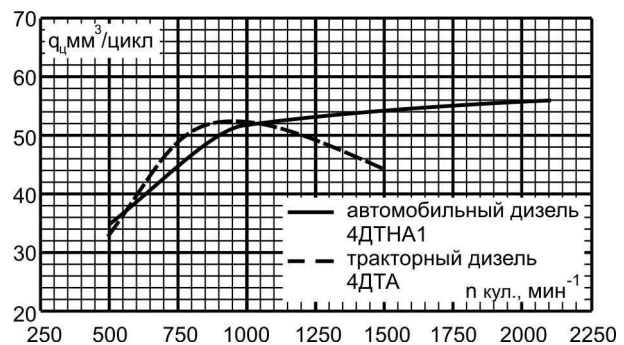


Рис. 6. Характеристики подачи топлива при работе дизелей на режимах внешней характеристики

### Конструктивные особенности других систем, узлов и деталей малолитражного дизеля

Кроме обеспечения заданных показателей рабочего процесса были приняты меры по повышению надежности работы узлов и деталей в условиях повышения тепловой, механической и инерционной

нагрузок автомобильного дизеля. Отличительными особенностями автомобильного дизеля являются:

- подача масла под давлением в форсунки системы охлаждения поршней и дополнительный водомасляный холодильник, конструктивно расположенный под фильтром тонкой очистки масла;

- материалы для изготовления коленчатого вала, коренных и шатунных подшипников; для изготовления коленчатого вала тракторного дизеля 4ДТА используется литая заготовка из специального чугуна, в то время как для автомобильного 4ДТНА1 – поковка из стали 18Х2Н4МА, обладающая большим запасом прочности;

- более тяжелые условия работы определили и замену материала коренных и шатунных подшипников в кривошипно-шатунном механизме; если для тракторного дизеля они изготовлены из сталеалюминиевой ленты АМО1-20, то на стальную основу автомобильных вкладышей наносится бронза БрС30;

- для обеспечения работоспособности механизма газораспределения на режиме номинальной мощности автомобильного дизеля выпускные клапаны, имея совершенно одинаковые геометрические размеры, для тракторного дизеля изготавливаются из сплава ЭИ107 (40Х10С2М), а автомобильного – из сплава ЭИ69 (40Х14Н14В2М);

- рабочая поверхность выпускного клапана автомобильного дизеля выполнена со специальной жаростойкой наплавкой, разработанной Киевским институтом электросварки им. Е.О. Патона.

### Заключение

В основу создания отечественного малолитражного автомобильного дизеля положена концепция параллельной разработки типоразмерного ряда унифицированных модификаций автомобильных и тракторных двигателей.

При создании малолитражного автомобильного дизеля уточнены регулировки, условия формирова-

ния внешней характеристики и характерные эксплуатационные режимы его работы, определяющие эксплуатационные показатели.

Представленные конструктивные отличия тракторной и автомобильной модификаций дизелей единого семейства ДТА показывают, что разработчик двигателя должен учитывать на этапе проектирования сферу его применения.

Широкое автотракторное, или другое народнохозяйственное, назначение может иметь только семейство унифицированных для подготовки единого производства двигателей.

Конкретная модификация дизеля не может быть применена по автомобильному и тракторному назначению одновременно.

### Список литературы:

1. Власов Л.И. О состоянии подотрасли общепромышленного двигателестроения и направлениях его развития // *Двигателестроение - Санкт-Петербург, 2003, №3, с. 3-4.*
2. Крутов В.И., Рыбальченко А.Г. *Регулирование турбонаддува ДВС // М.: Высшая школа, 1978. - 213с.*
3. Абрамчук Ф.И., Тимченко Д.И. *Улучшение технико-экономических и экологических показателей высокооборотных дизелей малой мощности путём изменения условий смесеобразования // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский науч.-техн. журн. - Харьков, НТУ "ХПИ", 2006. Вып. 1, С. 86-88.*
4. Блинов А.Д., Голубев П.А., Драган Ю.Е., Дрозденко В.Ф. *Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / Под ред. Папонова В.С. и Минеева А.М. - М.: НИЦ "Инженер", 2000, 332 с.*
5. Мороз В.И., Грицюк А.В., Братченко А.В., Норов А.В. *Разработка методики и проектирование безударных кулачков механизмов газораспределения высокооборотных транспортных дизелей // Матеріали 2-го міжнародного з'їзду з Теорії механізмів і машин. - Харків: ІМІС НАН України, 2005, С.66-75.*
6. Рикардо Г.Р. *Быстроходные двигатели внутреннего сгорания / Под общей редакцией Круглова М.Г. - М.: ГНТИМЛ, 1960, 412 с.*