

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЕЙ СЕРИИ Т ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИРОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Рассмотрены методы и средства совершенствования рабочего процесса с непосредственным впрыскиванием топлива и открытой камерой сгорания в целях повышения топливной экономичности и снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами при ограничении тепловой и механической нагрузки деталей дизеля.

Повышение конкурентоспособности создаваемых отечественных двигателей требует интенсификации научно-исследовательских работ, направленных на снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами, повышение топливной экономичности и ресурса. В полной мере это относится к дизелям серии Т, разработка которых начата ООО ГСКБ «Трансдизель» в 2008 г. для выпуска на производственных мощностях ООО «ЧТЗ-Уралтрак». Это новое перспективное семейство дизелей с турбонаддувом и максимальной унификацией основных узлов и деталей, которое состоит из 4- и 6-цилиндровых рядных, а также из 8-, 12-цилиндровых V-образных дизелей размерностью 13/15. Дизели предназначены для использования в модернизируемых и перспективных тракторах классов от 6 до 50 т тяги. На базе модельного ряда дизелей общепромышленного назначения планируется создание форсированных дизелей с высоким уровнем межпроектной унификации для применения в изделиях специального назначения.

В новых дизелях серии Т заложена возможность достижения следующих технико-экономических и экологических показателей:

- максимальная унификация по основным узлам, деталям и конструктивным элементам;
- запас по крутящему моменту не менее 30 %;
- удельный эффективный расход топлива не более 205 г/кВт·ч;
- расход масла на угар — 0,02–0,05 % от расхода топлива;
- ресурс не менее 18 000 мч;
- соответствие нормам выбросов вредных веществ на уровне ЕРА США Tier 4, а также требованиям правил ЕЭК-ООН № 96 и № 97/68

*В.С. Мурзин, директор-главный конструктор
ООО ГСКБ «Трансдизель»*

($\text{NO}_x + \text{CH} = 6,0 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$; $\text{CO} = 3,5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$; $\text{PT} = 0,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$).

Разрабатываемое семейство дизелей охватывает диапазон мощностей от 44 до 550 кВт (таблица).

Таблица

Марка дизеля	4Т371	6Т370	8ТВ372	12ТВ373
Мощность, кВт	44–184	103–265	140–368	206–550
Частота вращения, об/мин	2100–3000	2100–3000	2100–3000	2100–3000
Запас по крутящему моменту, %	30	30	30	30
Число и расположение цилиндров	4Р	6Р	8V	12V

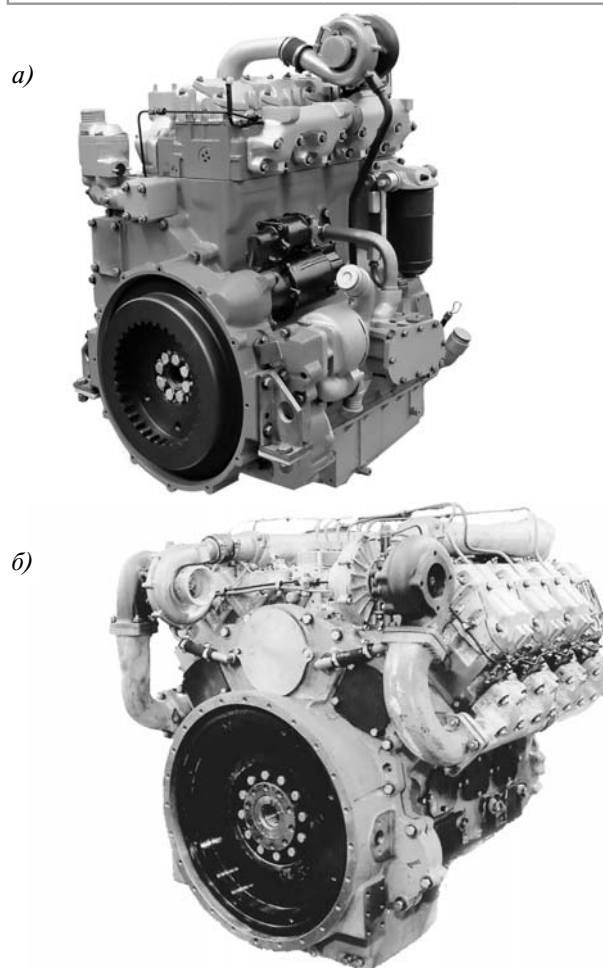


Рис. 1. Базовые дизели модельного ряда перспективного семейства 4Т371 (а) и 8Т372 (б)

В качестве базовых вариантов рассматриваются рядный дизель 4Т371 и V-образный 8Т372 (рис. 1).

В основу рабочего процесса базовых дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива положен преимущественно объемный способ смесеобразования, реализуемый в открытой камере сгорания, расположенной в днище поршня. Степень сжатия составляет 16–18 единиц. Топливная форсунка центрального расположения с многодырчатый распылителем закрытого типа, имеющим до восьми распыливающих отверстий. Четырехклапанная крышка цилиндров имеет профилированные впускные каналы для обеспечения закрутки воздушного потока при минимальных гидравлических потерях на впуске. В зависимости от требований и области применения дизели комплектуются следующими вариантами топливной аппаратуры:

- рядный плунжерный топливный насос высокого давления с электронным регулятором, неуправляемым или управляемым впрыскиванием топлива;
- индивидуальные секции топливного насоса высокого давления с электронным управлением клапанами;
- аккумуляторная система типа common rail с управляемым впрыскиванием топлива.

Дизели имеют газотурбинный наддув с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, элементами регулирования и частичной рециркуляцией отработавших газов. По результатам анализа расходных характеристик и совместной работы турбокомпрессоров с дизелями для каждой модификации, представленной в табл. 1, выбраны турбокомпрессоры ТКР 7Н1, ТКР 8,5С, ТКР 80-1А, ТКР 100.

Проведенные ранее поисковые научно-исследовательские работы с привлечением зарубежных партнеров выявили ряд проблем, важнейшей из которых является необходимость дальнейшего совершенствования рабочего процесса разрабатываемых дизелей.

Основные направления совершенствования рабочего процесса

Совершенствование рабочего процесса дизелей серии Т осуществляется с учетом выбранного способа смесеобразования. Особое внимание уделяется достижению эффективного смесеобразования и полноты выгорания топлива с учетом ограничений по выбросам вредных веществ с отработавшими газами, тепловой и механической нагруженностью деталей [1, 2]. Для достижения обозначенных целей необходимо решение следующих задач:

- обеспечение эффективного воздухообмена, гарантирующего работу по внешней ха-

рактеристике с коэффициентом избытка воздуха не менее 1,9–2,1;

- интенсификация впрыскивания топлива для его равномерного распределения в объеме камеры сгорания с наибольшей степенью гомогенизации смеси;

- обеспечение оптимального, с точки зрения экономичности и вредных выбросов, закона выгорания топлива;

- создание условий в камере сгорания для подавления процессов образования оксидов азота и других вредных веществ;

- снижение тепловой и механической нагруженности элементов внутрицилиндрового пространства и деталей дизеля.

Методы решения поставленных задач

Решение задач по совершенствованию рабочего процесса дизелей серии Т обеспечивалось сочетанием известных и новых методов:

- обеспечение параметров воздушного заряда достигается конструкцией индивидуальных четырехклапанных крышек цилиндров и регулируемых агрегатов наддува повышенной эффективности в сочетании с устройствами промежуточного охлаждения наддувочного воздуха;

- интенсификация впрыскивания топлива и равномерное распределение его в объеме камеры сгорания обеспечивается применением топливоподающей аппаратуры, реализующей давления впрыскивания до 180–200 МПа;

- эффективное смесеобразование обеспечивается оптимальным вихревым отношением закрутки воздушного заряда в сочетании с рациональными параметрами топливной струи (дальностью, углом раскрытия, распределения капель определенного диаметра), что позволяет получить топливовоздушную смесь заданной степени гомогенизации;

- обеспечение оптимального закона выгорания топлива достигается при реализации вышеприведенных методов в сочетании с управляемым законом впрыскивания топлива;

- создание условий в камере сгорания для ограничения процессов образования оксидов азота и других вредных веществ обеспечивается дополнительно к рассмотренным методам использованием рециркуляции охлажденных отработавших газов;

- применением устройств нейтрализации вредных газообразных веществ и улавливателей твердых частиц;

- снижение тепловой и механической нагруженности элементов внутрицилиндрового пространства и деталей дизеля с позиции рабочего процесса достигается ограничением интенсивности выгорания топлива в начальном периоде процесса сгорания и минимизацией тепловых потерь.

Средства реализации методов совершенствования рабочего процесса

Применение регулируемых агрегатов наддува повышенной эффективности в сочетании с устройствами промежуточного охлаждения наддувочного воздуха предполагает использование высоконапорных компрессоров с безлопаточными диффузорами и двухъярусными рабочими колесами, а также турбин с безлопаточными сопловыми аппаратами и байпасным регулированием. Для обеспечения качества переходных процессов необходимы турбокомпрессоры с малым моментом инерции ротора и короткими газоздушными трактами в системе наддува. Перспективно применение комбинированного двухступенчатого наддува. В качестве промежуточных охладителей наддувочного воздуха целесообразно применение регулируемых воздухо-жидкостных теплообменников с минимальными гидравлическими сопротивлениями по воздушному и жидкостному трактам.

Важнейшим средством повышения степени использования воздушного заряда является увеличение доли активного объема в пространстве сжатия. Это достигается уменьшением пассивных объемов, создаваемых повышенным надпоршневым зазором, излишним объемом подклапанных выточек, рациональным размещением верхнего компрессионного кольца по отношению к днищу поршня и т. п. Реализация этих решений требует тщательной конструкторской и технологической проработки. Необходимо учитывать, что для обеспечения высокой топливной экономичности дизеля отношение активного объема камеры сгорания к объему пространства сжатия должно быть не менее 0,75.

Применение топливоподающей аппаратуры, реализующей высокие давления впрыскивания (до 180–200 МПа) при оптимальном вихревом отношении воздушного заряда предполагает использование индивидуальных топливных секций ТНВД с электронным управлением, а в перспективе — аккумуляторной системы впрыскивания топлива типа common rail. Повышение давления впрыскивания топлива должно осуществляться в сочетании с оптимальным началом и продолжительностью процесса впрыскивания, а также корректированием числа и диаметра распыливающих отверстий. Для открытой камеры сгорания при непосредственном впрыскивании топлива число распыливающих отверстий должно быть не менее 7–8. Оптимизация вихревого отношения обеспечивается использованием специальных впускных каналов в головках цилиндров тангенциального или винтового типа с профилированными граничными обводами и минимальным гидравлическим сопротивлением. Последнее

достигается на компромиссной основе, поскольку обеспечение вихревого движения заданной интенсивности вступает в противоречие с возможностью получения высокого коэффициента наполнения цилиндра свежим зарядом. Для дизелей серии Т с открытыми камерами сгорания и высоким наддувом при частотах вращения коленчатого вала 2000–2500 об/мин вихревое число должно находиться в интервале 1,5–2,5.

Имеют большое значение размеры (глубина, максимальный диаметр, диаметр горловины и наклон вертикальной стенки) открытой камеры сгорания в поршне. Здесь имеются конкретные рекомендации ведущих производителей дизелей для соответствующего диаметра цилиндра. При этом учитывается размещение топливной форсунки в крышке цилиндра, которое должно быть центральным.

Управление процессом выгорания топлива в начальный период процесса горения, что важно для снижения образования NO_x , обеспечивается управляемым законом впрыскивания топлива с ограничением количества топлива, подаваемого в цилиндр за период задержки воспламенения. Управление процессом впрыскивания топлива позволяет осуществлять двух- и многофазный впрыск в сочетании с регулированием угла опережения подачи в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки дизеля. В современных топливоподающих устройствах такие возможности предоставляют аккумулирующие системы впрыскивания топлива типа common rail.

Использование рециркуляции охлажденных отработавших газов в сочетании с применением устройств нейтрализации отработавших газов и улавливателей твердых частиц предполагает возможность достижения показателей вредных выбросов, соответствующих мировому уровню.

Минимизация тепловых потерь достигается прежде всего повышением коэффициента избытка воздуха в целях обеспечения полноты сгорания топлива. Дальнейшее снижение тепловой нагруженности достигается рациональным перераспределением тепловых потерь между теплоотводящими системами, локальным охлаждением поршней, распылителей форсунок, клапанов газораспределения, огневой поверхности головок цилиндров, гильз цилиндров и блок-картера.

Результаты моделирования и экспериментальной проверки показателей рабочего процесса базовых моделей

На начальном этапе проектирования базовых дизелей были смоделированы индикаторные показатели рабочего цикла при ожидаемых характеристиках выгорания топлива. Для этих целей была использована разработанная в Южно-Уральском государственном университете методи-

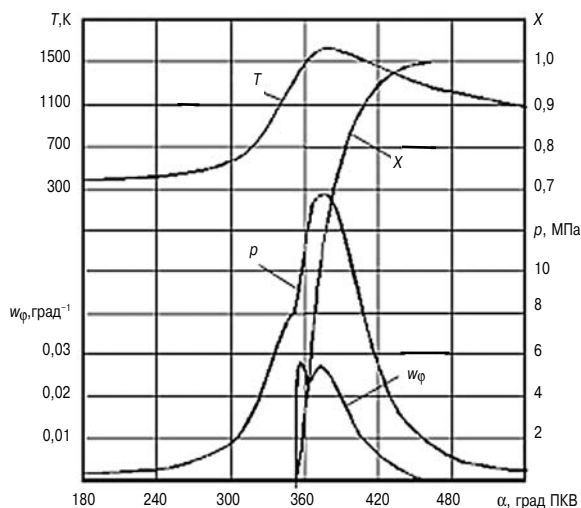


Рис. 2. Индикаторная диаграмма давления и температуры газов, характеристики выгорания топлива в дизеле 4Т371 ($p_{me} = 1,05$ МПа, $n = 2100$ об/мин)

ка расчета рабочего цикла И.И. Вибе, усовершенствованная А.Н. Лавриком и Д.К. Алексеевым [3]. Характеристики выгорания топлива были определены по теоретической модели, предложенной И.И. Вибе и развитой Е.А. Лазаревым [2].

Расчетные индикаторные диаграммы давления p и температуры T газов, характеристики выгорания топлива $x = f_1(\alpha)$ и $w_\phi = f_2(\alpha)$ представлены на рис. 2. Анализ индикаторной диаграммы показывает, что максимальное давление в цилиндре достигает 12,8 МПа, максимальная скорость нарастания давления 0,56 МПа/град ПКВ, максимальная температура цикла 1631 К, угол опережения начала сгорания 6° ПКВ до ВМТ, продолжительность процесса сгорания 115° ПКВ, максимальная скорость выгорания топлива $0,028$ град $^{-1}$, среднее индикаторное давление 1,47 МПа, удельный индикаторный расход топлива 194,5 г/кВт·ч. Дифференциальная характеристика выгорания топлива имеет два экстремума, что свидетельствует об отсутствии монотонного сгорания, обусловленного концентрационной и температурной неоднородностью смеси.

Экспериментальные характеристики дизеля 4Т371 представлены на рис. 3 и 4. Здесь пунктирные линии характеризуют показатели исходного варианта дизеля, а сплошные линии — доработанного варианта по результатам моделирования.

Режим номинальной мощности дизеля 4Т371 характеризуется средним эффективным давлением $p_e = 1,05$ МПа при $n = 2100$ об/мин. К реализованным по результатам моделирования мероприятиям относятся оптимизация вихревого отношения воздушного заряда за счет изменения профиля впускного канала, угла опережения впрыскивания топлива, параметров наддува и др.

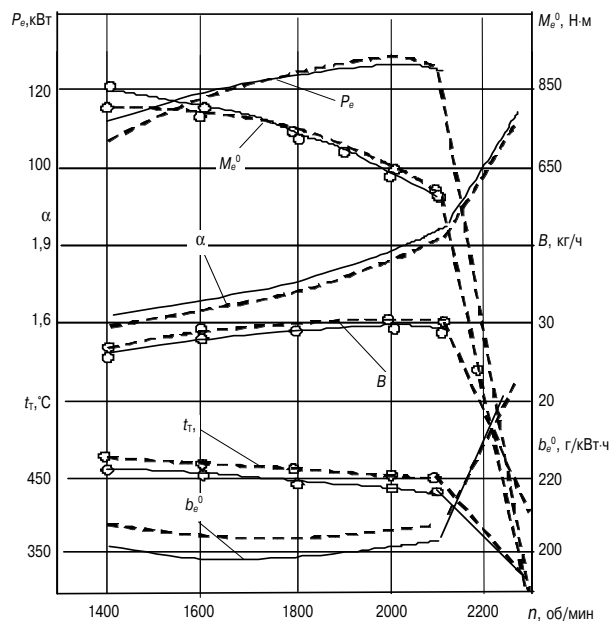


Рис. 3. Внешняя скоростная характеристика дизеля 4Т371

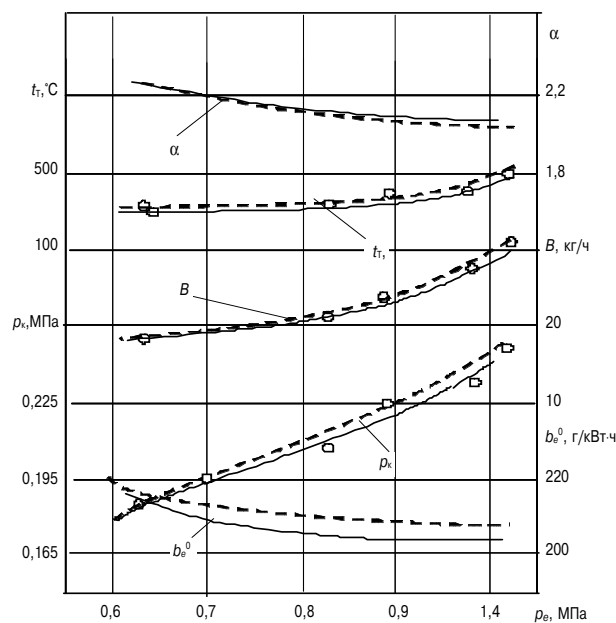


Рис. 4. Нагрузочная характеристика дизеля 4Т371 ($n = 2100$ об/мин)

При этом удалось добиться повышения топливной экономичности при заданной мощности дизеля, однако для достижения перспективных экологических норм необходимо дальнейшее совершенствование рабочего процесса. Предварительные испытания, проведенные фирмой «Ricardo», показали, что базовые дизели 4Т371.03.03 и 6Т370.02.03 в исходном варианте обеспечивают требования по вредным выбросам, соответствующие уровню Tier 2 стандарта ЕРА США.

В ближайшей перспективе для обеспечения требований уровня Tier 4 дизели серии Т будут

оборудованы топливной аппаратурой с системой common rail и давлением впрыскивания более 160 МПа. Кроме того, планируется доработать систему воздухообеспечения и очистки отработавших газов, включая: впускные и выпускные коллекторы, турбокомпрессор, охладитель наддувочного воздуха, элементы рециркуляции отработавших газов.

Выводы

Анализ современных направлений развития рабочего процесса дизелей и прогресс в реализации теоретических разработок свидетельствуют, что резервы в этом направлении далеко не исчерпаны. Необходимо сочетать известные и новые методы и средства совершенствования рабочего процесса с современными конструктивными решениями при модернизации основных механизмов и систем. При этом снижение тепловой и механической нагруженности для обес-

печения заданного ресурса позволяет надеяться на достижение дизелями серии Т мирового технического уровня и создать реальную конкуренцию зарубежным фирмам в своем типоразмерном ряду.

Литература

1. Мозер, Франц К. Тенденции и решения в разработке коммерческих дизелей // Материалы международной научно-технической конференции «Турбонаддув автомобильных и тракторных двигателей». — Протвино, 24–25 июня 2009.
2. Лазарев Е.А. Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей: монография. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2010. — 289 с.
3. Лаврик А.Н. Расчет и анализ рабочего цикла ДВС на различных топливах: монография. — Иркутск : Изд-во Иркутского ун-та, 1985. — 104 с.



ЭЛТОН

НОВОСТИ ЗАО «ЭЛТОН».

В КРАСНОДАРЕ ИСПЫТАН АВТОБУС НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРАХ, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ НА 40 % СНИЗИТЬ ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОПЛИВА И ЗНАЧИТЕЛЬНО СОКРАТИТЬ ВЫБРОСЫ В АТМОСФЕРУ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

В г. Краснодаре успешно завершились испытания опытных образцов нового для России вида городского транспорта — гибридного автобуса. Ключевым техническим решением в силовой установке автобусов является применение инновационных накопителей энергии — электрохимических конденсаторов, которые разработаны и производятся российской компанией «Элтон».

Результаты испытаний показали 40 %-ное сокращение расхода топлива по сравнению с современным автобусом с газовым двигателем. Испытания подтвердили, что благодаря применению электрохимических конденсаторов в ОГ автобуса практически отсутствуют вредные вещества, такие как CO, CH, NO_x. Экологические показатели гибридного автобуса соответствуют требованиям стандарта Евро 6. К дополнительным преимуществам следует отнести низкий уровень шума и вибрации.

Измерения проводились на маршруте E2, который проходит по загруженной транспортом главной улице города — Красной и связывает Депо №1 с железнодорожным вокзалом.

Первые в России гибридные автобусы («Экобусы») были выпущены на заводе «Тролза» (Саратовская область) в 2010 г. Силовая установка автобуса представляет собой газовую микротурбину, которая приводит ходовой электродвигатель и одновременно заряжает конденсаторный накопитель энергии. Дополнительная энергия вырабатывается за счет

рекуперации при электрическом торможении (торможении электродвигателем), которая также сохраняется в конденсаторном накопителе и в дальнейшем используется для разгона автобуса.

Особенностью работы городского общественного транспорта является частое повторение циклов разгон–торможение, которые приводят к значительному расходованию топлива и загрязнению атмосферы вредными выбросами. Использование электрохимических конденсаторов с рекуперацией энергии торможения позволяет эффективно решить обе эти проблемы.

Электрохимические конденсаторы способны быстро накапливать и отдавать энергию в объемах, на порядок превышающих аналогичные показатели для обычных конденсаторов. В отличие от аккумуляторов, они обладают высокой удельной мощностью, ресурсом не менее миллиона циклов заряда–разряда, не требуют технического обслуживания и надежно работают в условиях экстремальных температур. Эти изделия применяются не только в гибридном транспорте, но и в системах пуска двигателей внутреннего сгорания.

Россия является одним из мировых лидеров в сфере разработки и производства электрохимических конденсаторов. Продукция ЗАО «Элтон» экспортируется за рубеж с 1998 г., а недавно в США началось производство этих изделий по лицензии российской компании.