

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Иващенко Н.А.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва*

Циклический характер работы ДВС – один из его недостатков, но вместе с тем именно благодаря этому недостатку в ДВС реализуются высокие максимальные температуры и давления, что и обуславливает высокую экономичность ДВС. В отдельных образцах малооборотных судовых дизелей эффективный КПД достиг величины 0,52...0,56. В комбинированных силовых установках с дизелем и системами вторичного использования теплоты (силовые газовые турбины, другие типы расширительных машин, и др.) коэффициент использования теплоты достигает 80. .. 90%.

Основными факторами, обеспечивающими силовым установкам с поршневыми двигателями внутреннего сгорания преимущество перед другими типами силовых установок, являются: низкая удельная стоимость (цена/кВт энергии установки); высокая объемная (массовая) энергоемкость (кВт/кг, кВт/м.куб); способность удовлетворять непрерывно ужесточающимся законодательным ограничениям по эмиссии вредных веществ, шуму, экономичности, безопасности; адаптация к рециклированию; резервы дальнейшего развития и адаптация к требованиям развития транспортных средств и энергоустановок. Именно эти показатели качества силовых установок с ДВС дают основания рассматривать их и на ближайшую перспективу как основной вид первичных источников энергии на транспорте и в малой энергетике.

Совершенствование показателей качества транспортных дизелей в последние десятилетия XX века происходило в направлении непрерывного повышения их удельной мощности, снижения выбросов токсичных веществ с отработавшими газами, ограничения уровня виброакустического излучения и повышения надежности. Главным средством для повышения удельной мощности по-прежнему является наддув дизелей и в меньшей степени удельная мощность увеличивалась путем повышения частоты вращения. Наддув двигателей обеспечил транспортным дизелям высокие мощностные показатели, превосходные показатели по маневренности (прежде всего улучшил их внешние характеристики), а повышение частоты вращения легких дизелей до 4000-5000 мин⁻¹ несколько сократил разрыв в литровой мощности между бензиновыми двигателями и дизелями. Характерно, что фирмы для достижения высоких показателей решительно пошли на внедрение технических решений, связанных со значительным усложнением конструкции двигателей и их систем. В конструкции двигателей внедрены системы воздухообеспечения с переменной геометрией, агрегаты

наддува с разнообразнейшими средствами регулирования турбин и компрессоров, управляемые фазы газораспределения, интегрированные электронные системы управления топливоподачей, воздухообеспечением, нейтрализации выпускных газов, бортовые системы диагностирования и др. Произошло значительное форсирование двигателей по параметрам рабочего процесса. Например, максимальное давление сгорания в автомобильных дизелях достигло 15-16 МПа, создается топливная аппаратура с максимальным давлением впрыскивания 160-200 МПа. При этом достижение высоких показателей дизелей по показателям функционирования, экологическим показателям и надежности неразрывно связано с повышением качества изготовления деталей, применением новых конструктивных и композитных материалов.

Наибольшая эффективность при решении проблемы повышения экономичности, снижения токсичности и улучшения внешней характеристики может быть достигнута при совместном управлении топливоподачей и воздухообеспечением. Это управление позволяет целенаправленно изменять коэффициент избытка воздуха α путем согласования подачи воздуха с величиной цикловой подачи топлива в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля. Увеличение давления наддува p_k с низкими α дает возможности уменьшать угол опережения впрыскивания с целью снижения эмиссии оксидов азота NOx без заметного снижения экономичности и увеличения выбросов CO и CHx и сажи. Требуемый закон управления давлением наддувочного воздуха может быть реализован с использованием различных способов воздействия на процессы воздухообеспечения: регулирование компрессора поворотными лопатками на входе и выходе, дросселирование воздуха после компрессора; выпуск в атмосферу части сжатого воздуха; дросселирование воздуха на входе в компрессор; подвод дополнительной энергии к турбокомпрессору; перепуск части сжатого в компрессоре воздуха в турбину; дросселирование газа на выходе из турбины; регулирование турбины поворотом сопловых лопаток (РСА); регулирование проходного сечения турбины; перепуск части газов мимо турбины; применение дополнительной (форсажной) камеры сгорания перед турбиной; управляемый привод клапанов. Эти способы имеют различную эффективность, надежность и технические трудности при реализации. В последнее время ряд зарубежных фирм разработали для транспортных двигателей турбины с РСА либо турбины с регулируемым сечением соплового аппарата (Гаррет, ККК, Холсет, Хино, Альфа Ромео, Швитцер, Аэродайн Даллас и др.). Внедрение турбокомпрессоров с таким способом регулирования позволило снизить эксплуатационные расходы топлива на 7-12%. Ряд фирм стал применять в бензиновых двигателях и дизелях турбокомпрессоры с встроенным электродвигателем для подкрутки турбокомпрессора на некоторых режимах для получения большего давления

наддува и расхода воздуха или системы наддува с приводным нагнетателем и свободным турбокомпрессором.

Наибольшее распространение для управления воздухообеспечением в транспортных дизелях с наддувом получил способ перепуска части газа мимо турбины. Он оказался наиболее простым в реализации для дизелей с невысоким уровнем наддува ($\pi_k = 1,5 - 2,0$) и позволяет регулировать частоту вращения ротора турбокомпрессора и давление наддува в довольно широких пределах.

Большое внимание при разработке системы воздухообеспечения имеет согласование характеристики турбокомпрессора с гидравлической характеристикой дизеля. При этом для транспортных дизелей стремятся подобрать турбокомпрессор, максимальный КПД которого достигается на режимах с $n = 0,4 - 0,7 n_{nom}$. Формирование базовых характеристик, обеспечиваемых регулируемым турбокомпрессором и системой топливоподачи, управляемой электронным регулятором, позволяет снизить среднеэксплуатационный расход топлива на 1,5%, уменьшить эмиссию оксидов азота NOx на 45%, эмиссию CO на 30%, эмиссию CH на 23% (по сравнению с характеристиками дизеля с нерегулируемым турбокомпрессором). Хорошие результаты дает применение так называемой комбинированной системы наддува с изменяемой геометрией впускного тракта, в которой сочетаются турбонаддув и инерционный наддув.

В последнее время усилился интерес к управляемым фазам газораспределения и многие фирмы имеют двигатели с достаточно эффективными механизмами изменения фаз газораспределения. Так, японские фирмы для своих бензиновых двигателей применяют системы VTEC (фирма Honda), VVT-I и VVT-L (фирма Тойота), позволяющие в широких пределах изменять фазы открытия и закрытия клапанов и ступенчато изменять их подъем. Фирма BMW применяет механическую систему регулирования фаз газораспределения, основанную на бесступенчатом сдвоенном механизме VANOS и механизме Valvetronic, бесступенчато изменяющим высоту подъема клапана.

Однако наибольшими функциональными возможностями и эффективностью воздействия на показатели двигателей обладает система с электромагнитным приводом клапанов с электронным управлением. Она позволяет реализовывать различные циклы, такие как цикл Аткинсона, цикл Миллера, организовывать требуемое перекрытие клапанов, изменять высоту подъема клапанов, организовывать процесс газообмена с повышенным содержанием остаточных газов (цикл с внутренней рециркуляцией остаточных газов) / 2 /.

Важнейшее влияние на рабочий процесс, эффективные и экологические показатели дизелей оказывает топливоподающая аппаратура (ТПА). Ведущими тенденциями в развитии ТПА являются электронное регулирование топливоподачи, двигателем и интенсификация впрыскивания.

Значительные резервы в повышении показателей качества двигателей кроются в совершенствовании систем управления двигателями. Электронные системы управления значительно расширили перечень управляемых параметров, включив в них давление и характеристики впрыскивания, сечения распыливающих сопел, количество и фазы впрысков, параметры воздухообеспечения, фазы газораспределения и др. Оптимальные значения этих параметров зависят большого числа факторов, учесть которые удастся только при переходе к электронным регуляторам. Электронное управление позволяет решить и проблемы создания эффективных газовых двигателей.

Экономически целесообразный процентный выход из нефти отдельных видов топлив (керосин, бензин, дизельное топливо, топлива широкого фракционного состава и тяжелые топлива) оставляет актуальной проблему совершенствования бензиновых двигателей. В последнее время существенно вырос КПД бензиновых двигателей нового поколения с распределенным впрыском топлива во впускной трубопровод и с непосредственным впрыском бензина в цилиндр / 3 /. Повышение экономичности было достигнуто благодаря переходу на четырехклапанное газораспределение, повышению турбулентности заряда в цилиндре, повышению степени сжатия двигателей до 10,5...12,0, применению управляемых фаз газораспределения (в первую очередь, момента закрытия впускных клапанов), расширению пределов эффективного обеднения смеси и переходу на качественное регулирование мощности (двигатели с впрыском топлива непосредственно в цилиндр). Кроме повышения экономичности бензиновых двигателей в последние годы достигнуто значительное (на 90 ... 95%) снижение токсичных выбросов с отработавшими газами. Это было обеспечено прежде всего массовым внедрением электронных систем впрыска бензина, микропроцессорных систем управления рабочими процессами с обратной связью, поддерживающих в так называемых стехиометрических двигателях состав смеси в узких пределах ($\alpha=0,995 \dots 1,005$), либо в двигателях с непосредственным впрыском в цилиндр, обеспечивающих изменение коэффициента избытка воздуха в широких пределах ($\alpha=0,9 \dots 4,0$).

Эксплуатационный расход топлива ДВС можно существенно уменьшить путем применения интегрированных электронных систем управления двигателем и всей силовой установкой машины, в составе которой работает двигатель.

Наряду с повышением экономичности и улучшением экологических характеристик ДВС весьма актуальной задачей является расширение сортамента применяемых видов топлив и улучшение их качества. Прежде всего речь идет о более широком использовании двигателями природного и попутного газа, что позволяет уменьшить выброс в атмосферу токсичных веществ и примерно вдвое сократить выброс углекислого газа CO_2 . Следует отметить возможность более широкого использования синтетических

топлив, получаемых из угля и горючих сланцев, водноугольных и топливноугольных суспензий, а также топлив из возобновляемых источников (биогаз, спирты, эфиры, растительные масла). Значительный интерес в качестве моторного топлива представляет диметиловый эфир CH_3OCH_3 , который можно применять в дизелях со сравнительно небольшой модернизацией топливной аппаратуры, получая значительный выигрыш по экологии.

С точки зрения теплотворной способности и эмиссии токсичных компонентов в выпускных газах водород является самым лучшим из возможных альтернативных топлив, однако себестоимость получения водорода электролизом воды, гидрированием угля, частичным окислением углеводородных топлив и другими способами в пересчете на энергетическую единицу пока в 2-10 раз выше себестоимости получения природного газа и традиционных жидких топлив.

Видное место в обосновании концепции транспортного двигателя принадлежит средствам снижения эмиссии токсичных веществ двигателями. Все известные на сегодня методы можно разделить на три группы. К первой группе следует средства, обеспечивающие уменьшение образования токсичных веществ в двигателе (совершенствование конструкции двигателя, систем топливоподачи, процессов смесеобразования и сгорания, турбонаддув и управляемое воздушное снабжение, рециркуляция отработавших газов, комплексное электронное управление топливоподачей и воздушным снабжением, рециркуляция отработавших газов). Ко второй группе относятся мероприятия химмотологического характера, такие как уменьшение содержания серы в топливе (до величин 50 ppm и в перспективе до величины 30 ppm), ограничение содержания в топливе ароматических углеводородов (не более 10%), увеличение цетанового числа, обогащение топлива кислородом, применение антидымных и других присадок к топливу, применение смазочных материалов с повышенными экологическими свойствами. Третья группа мероприятий связана с нейтрализацией вредных веществ в выпускном коллекторе (фильтры твердых частиц, каталитические окислительные и восстановительные нейтрализаторы). К этой же группе следует отнести и средства ограничения акустического излучения (глушители, капсулирование, экранирование).

Уровень шума на впуске и выпуске снижают путем соответствующей организации рабочего процесса (выбором угла опережения впрыскивания топлива или воспламенения смеси, закона подачи топлива, многократным впрыском, подбором формы камеры сгорания и др.), применением конструктивных материалов с повышенным уровнем вибропоглощения (пластмассы, композиты, многослойные материалы), правильным выбором расположения ребер жесткости и опор, минимизацией зазоров в сопряжениях, подверженных знакопеременным нагрузкам (поршень-цилиндр, ше-

стеренчатые и цепные передачи и др.) а также применением глушителей шума и капсулированием двигателя.

Успехи в развитии ДВС достигнуты на фоне острой конкурентной борьбы с другими видами энергоустановок. Так, в 1960-е годы велись интенсивные работы по созданию паровых двигателей. В 1970 годах зарубежные фирмы вкладывали огромные средства на создание автомобильных газотурбинных двигателей и двигателей Стирлинга. Но автомобильные газотурбинные двигатели и двигатели Стирлинга не смогли конкурировать с ДВС в основном по двум показателям – стоимости и экономичности.

В конце XX века и начале XXI века усилия автомобилестроительных фирм сосредоточились в основном на создании силовых установок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (бензиновыми, газовыми, дизелями), гибридных силовых установок и силовых установок на топливных элементах. Каждый из этих видов силовых установок весьма перспективен и имеет свои экологические ниши. Причем наиболее реально в ближайшем будущем широкое применение силовых установок с поршневыми двигателями и гибридных силовых установок различных схем. Тем более, что к гибридизации силовых установок подталкивает непрерывное увеличение мощности бортовых потребителей электроэнергии. Широкие возможности комбинации в различных схемах элементов гибридных силовых установок (первичного двигателя, электрических машин, накопителей и преобразователей энергии) открывают перспективы снижения эксплуатационного расхода топлива в полтора раза за счет оптимизации работы двигателей, электрических машин, рекуперации энергии торможения транспортного средства, движения в электрической моде в режимах трогания и остановки.

Что же касается силовых установок на топливных элементах, несмотря на всю их привлекательность по экономичности и экологическим характеристикам, трудно рассчитывать на значительное снижение стоимостных и массогабаритных показателей. Существует множество проблем, требующих решения на пути внедрения топливных элементов. Упомянем некоторые из них / 1 /.

Стоимость крупномасштабного производства топливно-элементных систем, основанного на современном уровне технологии (350 дол/кВт установки), пока в семь раз превышает стоимость, которую необходимо иметь для конкурентноспособности с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Стоимость только платины в современной системе с топливными элементами мощностью 50 кВт оценивается величиной 57 долл/кВт. Только эта составляющая стоимости выше величины, которую должна иметь вся силовая установка к 2004 г. (50 долл/кВт). Потребности в платине, необходимой для создания каталитического покрытия электро-

дов топливных элементов, слишком велики и не могут быть обеспечены промышленностью.

Долговечность работы таких компонентов, как мембрано-электродная сборка и каталитический топливный процессор, пока не достигла требуемого уровня в 5000 часов.

Время подготовки системы с топливными элементами к работе, определяемое топливным процессором, лежит в пределах 6-20 минут, что неприемлемо для владельцев автомобилей.

Современные компрессоры не могут обеспечить требуемую управляемую подачу воздуха в батарею топливных элементов. Это приводит к излишней подаче воздуха в топливный элемент, дополнительной нагрузке на компрессор, понижению общего КПД системы, увеличению размеров батареи топливных элементов, ее массы и стоимости.

Фундаментальной проблемой в топливно-элементной технологии является получение и хранение топлива. Выбор способа хранения на борту водорода теснейшим образом связан с инфраструктурой получения и распределения топлива. Фактически инфраструктуры получения водорода и метанола отсутствуют. В США, Германии, Японии и других развитых странах существуют несколько станций, в которых можно пополнить запас водорода или метанола в автомобиле. Создание таких инфраструктур требует огромных капитальных вложений. Водород можно хранить на борту автомобиля в сжатом виде в баллонах под давлением 10-90 МПа, в криогенной емкости в жидком состоянии при температуре $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, в металлгидридных аккумуляторах, а также может храниться на борту в составе другого топлива и по мере надобности выделяться из этого топлива (электролиз воды, получение водородосодержащего газа в термохимическом реакторе-реформинге и др.). В любом случае хранение или получение водорода на борту из другого носителя порождает массу инженерных проблем, приводящих к необходимости создания на борту устройств, имеющих большие габариты, массу и представляющих опасность в эксплуатации.

Получение водорода на борту из метанола, бензина или другого углеводородного топлива, электролизом или другим способом приводит к необходимости создания миниатюрной бортовой водородной фабрики, увеличивающей массу автомобиля и усложняющей его системы. Кроме того, получаемый в топливных процессорах водород (водородосодержащий газ) не является химически чистым и для использования в топливном элементе должен быть очищен от примесей, способных вызвать отравление катализатора топливного элемента (окись углерода, соединения серы и др.).

И в то же время, хоть водород по массе обладает наивысшей теплотворной способностью (в три раза больше бензина), учитывая его невысокую объемную плотность чрезвычайно трудно запастись достаточным его количеством в емкости обычного размера. В приемлемых габаритах ком-

мерчески доступные баллоны с давлением газа 24 Мпа при полном наполнении водородом обеспечивают пробег автомобилю 190 км. Увеличить запас водорода на борту можно увеличением давления в баллоне. Созданы устройства, способные хранить водород под давлением о 69 МПа (7,5% водорода по массе). Создаются баллоны, рассчитанные на большие давления и способные вмещать больше водорода.

Хранение жидкого водорода в криогенной емкости при температуре 20 К (-253 градуса С) приводит к излишнему весу, сложности системы и проблемам с безопасностью.

Альтернативным способом хранения водорода на борту автомобиля является использование материалов, которые способны при определенных условиях поглощать водород и хранить его в своей кристаллической структуре (металлгидриды) и выделять его при нагревании. Создан аккумулятор, который обеспечивает зарядку водородом 7% от массы гидрида (7г водорода на 100г гидрида). Однако в центре внимания создателей металлгидридного аккумулятора по-прежнему остаются задачи снижения его размеров и массы, а также стоимости. Магний – гидридная пудра стоит примерно 4\$ за фунт, поэтому только магниевый порошок увеличит стоимость автомобиля примерно на 1000\$.

Для обеспечения работы топливного элемента требуется определенное число достаточно сложных устройств, потребляющих энергию. Поэтому в разработку автомобиля и его систем вкладывают не меньше усилий, чем в разработку батарей топливных элементов. В частности, для функционирования батареи топливных элементов автомобиль должен иметь на борту эффективный компрессор, промежуточный охладитель воздуха, фильтры, обеспечивающие приемлемое содержание примесей в потоках воздуха, водорода и воды, увлажнители, поддерживающие влажность потоков газов в пределах, предотвращающих высыхание протонно-обменной мембраны, различные устройства, преобразующие энергию для обеспечения ею некоторых химических процессов в топливном процессе. Кроме того, энергия батареи топливных элементов должна быть распределена по потребителям. Обычно автомобили с топливными элементами используют такие же системы электронного управления и компоненты (датчики, мультиплексоры, аналого-цифровые преобразователи), как и автомобили с двигателями внутреннего сгорания, хотя алгоритмы микропроцессорного управления другие. Управление трансмиссией почти такое же, как и в электромобилях на аккумуляторных батареях, однако система управления состоит из двух подсистем: подсистемы управления величиной крутящего момента трансмиссии и подсистемы управления мощностью батареи топливных элементов.

Другой редко упоминаемой проблемой, связанной с разработкой силовых установок на топливных элементах, является проблема теплорассеивающих устройств. В ДВС две трети сбросового тепла уходит с выпуск-

ными газами, треть рассеивается радиатором. В энергоустановках на топливных элементах около 80% теплоты сбрасывается через радиатор, который должен иметь соответствующие размеры для рассеивания большого количества теплоты при повышенных температурах окружающей среды. Специалисты по теплопередаче сталкиваются с новыми проблемами в создании систем охлаждения для автомобилей с топливными элементами, что требует новых подходов в их решении.

Еще одной проблемой является совместимость материалов. Очень важным для топливных элементов является контроль цепей проводимости. Топливные элементы требуют отсутствия ионизируемых материалов в полостях, поэтому необходимо использовать деионизированную воду и специальные охлаждающие жидкости. В некоторых охлаждающих контурах используют деионизированные покрытия, нержавеющие стали, некоторые сплавы алюминия и изолирующие полимеры.

Ахиллесовой пятой топливных элементов может стать склонность к замораживанию. Если воду не удалять из топливного элемента после остановки автомобиля, то при низкой температуре кристаллы льда могут разрушить ультратонкую полимерную мембрану (толщина мембраны несколько десятков микрон).

Понятно, что топливные элементы имеют больший КПД, более низкий уровень шума, они могут быть базой для создания энергоустановок с нулевым или близким к нулевому уровнями выбросов вредных веществ, которые могут работать на возобновляемых топливах. Следует учесть, что топливные элементы можно эффективно использовать в гибридных силовых установках в комбинации с аккумуляторными батареями, конденсаторными или другими накопителями, что даст возможность использовать топливные элементы с меньшей мощностью, но с большим КПД. Однако масштабы проблем, стоящих перед разработчиками силовых установок на топливных элементах, настолько серьезны, что не дают оснований на перспективы массового внедрения этих силовых установок на транспорте в ближайшие десять-пятнадцать лет, поэтому силовые установки с ДВС останутся на ближайшую перспективу как основной вид первичных источников энергии на транспорте и в малой энергетике. Вторыми по масштабу распространения станут гибридные силовые установки с поршневыми ДВС в качестве первичных источников энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Automotive Engineering, 2001, March, pp. 64-80.
2. Automotive Engineering, 2000, February, pp. 36-40.
3. Nohira H., Ito S. Development of Toyota's Direct Injection Gasoline Engine AVL Conference // Engine and Environment 97.- Vol. 1, 1997.