

ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОТОКСИЧНОЙ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВА

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

Поэтапный ввод в действие новых экологических нормативов для двигателей внутреннего сгорания диктует необходимость опережающей разработки и внедрения технических средств, обеспечивающих их выполнение. Можно констатировать, что именно обеспечение необходимых экологических показателей стало главным приоритетом при создании новых двигателей и модернизации существующих.

На ближайшую перспективу решение проблемы достигается за счет совершенствования рабочего процесса, систем наддува и топливоподачи. В более отдаленной перспективе возникает необходимость в использовании внешних систем очистки отработавших газов. В материалах обзора описываются трудности, связанные с внедрением систем каталитической очистки. Упоминаются также другие конструктивные новшества, примененные в рассматриваемых двигателях.



Mercedes-Benz OM 471

DAIMLER ПЕРЕХОДИТ НА EURO 6

Хотя до официального вступления в силу нормативов Евро 6 остается еще около трех лет, компания «Daimler Trucks» уже запустила в серию новый типаж двигателей для грузовых машин Mercedes-Benz. Новый ряд двигателей был разработан специально для европейского рынка. Эти двигатели, помимо грузовиков, могут устанавливаться также на внедорожных транспортных средствах.

Первой моделью нового семейства двигателей, названного «Blue Efficiency Power OM 47х» стал двигатель Mercedes-Benz OM 471. В семейство войдут три модели шестицилиндровых рядных двигателей, отличающиеся рабочим объемом. Все три модели двигателя имеют одинаковую конструкцию, но могут иметь различные аксессуары в зависимости от назначения машины. Планы создания двигателей нового поколения появились еще в 2002 г., но фактически их разработка началась в Штутгарте лишь пять лет назад. Новые двигатели Blue Efficiency Power выпускаются на предприятии «Daimler» в Маннхайме наряду с компонентами двигателей «Detroit Diesel» и дизелей, предназначенных для грузовиков «Fuso».

В основу разработки положена новая платформа, использованная в мощных двигателях «Daimler Trucks», которые с 2007 г. выпускаются для грузовиков Freightliner производства североамери-

канской группы «Daimler», а с 2010 г. — также и для японских грузовиков «Fuso».

По мнению специалистов «Daimler», европейский рынок отличается большим разнообразием нормативов вредных выбросов и условий эксплуатации. Кроме того, практикуются разные способы установки автомобильных двигателей — традиционный (перед кабиной водителя) и под кабиной. Вследствие этого явилось множество версий основных компонентов двигателя, к числу которых относятся, в частности, турбоагрегаты, маховики, электронные системы управления, системы выпуска и т. д. Кроме того, существует достаточно много вариантов настроек рабочих параметров, в том числе номинальной мощности и крутящего момента. Все это приводит к тому, что, например, двигатели, производимые в Германии, отличаются от двигателей, выпускаемых в Северной Америке и Японии, более чем двумя сотнями компонентов.

Новая модель Mercedes-Benz OM 471 представляет собой вертикальный шестицилиндровый рядный двигатель с рабочим объемом 12,8 л и мощностью от 310 до 375 кВт при 1800 об/мин. Максимальный крутящий момент — от 2100 до 2500 Нм при 1100 об/мин. У всех версий нового двигателя одна и та же номинальная частота вращения.

OM 471 имеет четыре варианта исполнения по номинальной мощности — 310, 330, 350 и 375 кВт — и четыре варианта по крутящему

моменту. Кроме того, существуют две конфигурации по тормозной мощности. Три из четырех вариантов исполнения по номинальной мощности имеют опцию дополнительного изменения скоростных характеристик, названную «Torque». Например, двигатель грузовика при работе на высшей передаче автоматической трансмиссии может развивать тормозной момент на 200 Нм выше номинального.

В новых двигателях используются следующие современные технологии: рециркуляция отработавших газов с охлаждением (EGR), фильтр твердых частиц (DPF) и система каталитической очистки (SCR). Блок управления двигателем представляет собой следующее поколение модуля управления типа MR₂, применяемого на двигателях Mercedes-Benz 500.

Продолжительность работы до технического обслуживания двигателя увеличена и может составлять до 150 000 км в зависимости от типа машины и эксплуатационного профиля. Для упрощения техобслуживания масляный фильтр и модуль фильтрации топлива размещен на холодной стороне двигателя. Модуль фильтрации топлива состоит из фильтра предварительной очистки, основного фильтра и водоотделителя.

Двигатель Mercedes-Benz OM 471 имеет электронное управление. Впрыск топлива осуществляется системой common rail с мультипликатором давления типа X-Pulse, разработанным фирмой «Bosch» специально для грузовиков «Daimler». Система common rail позволяет широко варьировать параметры впрыска, в том числе давление, фазы, общую цикловую подачу и частичную подачу при многофазном впрыске. Параметры впрыска регулируются индивидуально по каждому цилиндру, что позволяет выравнивать возможные расхождения параметров по цилиндрам.

Система common rail X-Pulse включает в себя мультипликатор давления и двухпоршневой насос высокого давления, позволяющий создавать давление до 900 бар. Перед форсунками давление дополнительно повышается и может достигать 2100 бар. Давление впрыска непрерывно регулируется по задаваемой программе в соответствии с текущим рабочим режимом.

За каждый цикл происходит несколько впрысков. В конце такта сжатия происходит один или два пилотных впрыска. Временная характеристика последующего главного впрыска подбирается таким образом, чтобы сохранять расход топлива на минимальном уровне, не допуская при этом увеличения вредных выбросов сверх установленных пределов. Послевпрыск обеспечивает практически полное сгорание твердых частиц, а при необходимости может быть использован также для регенерации фильтра частиц. В выпуск-



Форсунка и камера сгорания двигателя OM 471

ном тракте двигателя имеется горелка с дозатором топлива для управления процессом активной регенерации сажевого фильтра.

Система X-Pulse имеет резерв для повышения давления впрыска до 2500 бар. Форсунка X+Pulse, разработанная специально для двигателей Mercedes-Benz, по своей конструкции отличается от форсунок двигателей грузовиков «Daimler», выпускаемых за пределами Европы.

Турбокомпрессор для Mercedes-Benz OM 471 поставляется фирмой «Borg-Warner». Он представляет собой турбокоагнетатель с фиксированной геометрией, асимметричным корпусом турбины и системой охлаждения воздуха. Асимметричная конструкция корпуса позволяет направить поток отработавших газов из первых трех цилиндров через систему рециркуляции непосредственно в турбину без дополнительных потерь, что улучшает динамику двигателя.

Перепускной клапан ограничивает давление наддува, что также способствует улучшению динамики двигателя при разгоне. Блок управления двигателем регулирует положение перепускного клапана в зависимости от рабочего режима с помощью клапана регулирования давления.

В двигателе OM 471 имеется трехступенчатый тормоз-замедлитель, повышающий управляемость транспортного средства, особенно на промежуточной скорости. Кроме того, на двигателе применена система декомпрессионного торможения с наддувом, конфигурация которой соответствует европейским требованиям. Время реакции системы — менее 150 миллисекунд.

Трехступенчатый тормоз-замедлитель управляется рычагом, расположенным на рулевой колонке. Включение первой ступени приводит в действие тормоз-замедлитель в трех из шести цилиндров. На второй ступени включаются остальные три цилиндра. При переходе на третью (высшую) ступень вступают в действие клапан EGR и органы управления перепускным клапаном. При этом увеличивается масса воздушного заряда в цилиндрах и достигается максимальная мощность торможения 400 кВт при 2300 об/мин. Помимо ручного управления, тормоз-замедлитель может использоваться в автоматическом режиме

для создания плавно регулируемого тормозного момента.

Картер двигателя представляет собой вертикально ориентированную конструкцию с ребрением, придающим ей дополнительную жесткость и снижающим уровень шума. Для уменьшения веса двигателя поддон выполнен из синтетического материала, а пространство, занимаемое цилиндрами, сведено к минимуму с целью снижения габаритных размеров.

В конструкции использованы цельнокованные стальные поршни, увеличивающие ресурс двигателя. Применение мокрых цилиндрических втулок способствует лучшему охлаждению. При этом основной поток охлаждающей жидкости омывает верхнюю треть втулки, тогда как нижняя треть втулки, имеющая более низкую температуру, омывается вторичным потоком. Для повышения эффективности охлаждения расстояние, проходимое охлаждающей жидкостью, во всех случаях сведено к минимуму.

В двигателе применены стальные шатуны с разъемной нижней головкой. Такая схема обеспечивает максимальную жесткость конструкции и надежность стыка.

Головка блока — цельная, из чугуна с пластинчатым графитом (уплотненный серый чугун). Этот материал выдерживает значительные колебания температуры, обладает хорошими демпфирующими свойствами и минимальным коэффициентом линейного расширения при высоких температурах.

Новый двигатель прошел полный цикл испытаний, при этом общий пробег на стендах и в условиях эксплуатации составил более 60 млн километров. По словам представителя фирмы, в Северной Америке и Японии на грузовиках «Freightliner» и «Fuso» сейчас работают более 70 000 двигателей «Daimler».

Roberta Prandi. Launching Into Euro 6 Diesel Progress International Edition, May–June 2011

SCANIA. ЕВРО 6 — НЕ ПРЕДЕЛ

Чтобы помочь операторам заранее ознакомиться с новыми технологиями, обеспечивающими выполнение перспективных требований экологического законодательства, фирма Scania обнародовала описание двух новых двигателей Евро 6 рабочим объемом 13 л. Двигатели предназначены, в первую очередь, для дальних грузовых перевозок, но могут быть использованы и по

другому назначению. Эти двигатели мощностью 324 и 353 кВт соответственно имеют тот же расход топлива, что и их прототипы Евро 5, но вредные выбросы у них существенно ниже.

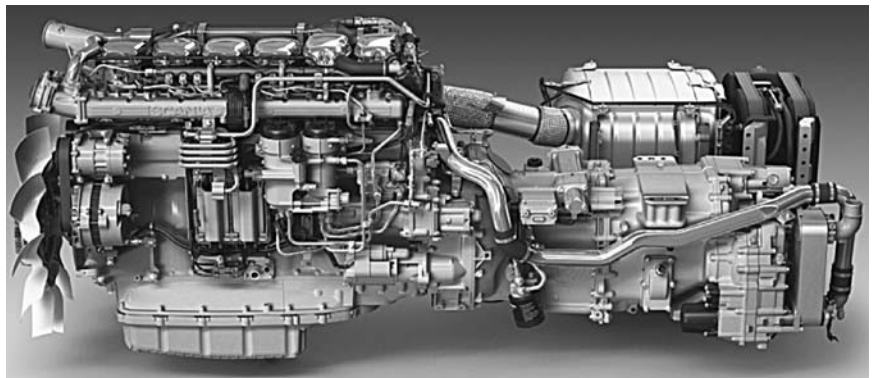
Таким образом, операторы получают возможность уже сейчас использовать наиболее передовые экологические технологии, предлагаемые сегодня на рынке. При этом они могут претендовать на разнообразные виды экономического стимулирования со стороны государства, включая, в частности, сниженную ставку дорожного налога.

В категорию Евро 6 переводятся все модификации двигателей Scania серий G и R для всех применений, включая грузовики класса ADR (Европейское соглашение о международных шоссейных перевозках опасных грузов). Начиная с 2012 г., этими двигателями будут оборудоваться также многоосные машины с колесными формулами 8×2 и 8×4.

Все разработки выполнены собственными силами «Scania» с использованием таких современных технологий, как рециркуляция отработавших газов (EGR), регулируемый турбокомпрессор (PTK), система впрыска типа common rail, селективное каталитическое восстановление (SCR) и фильтрация твердых частиц.

По основным технико-экономическим характеристикам новые двигатели не отличаются от своего прототипа Euro 5 EGR. Соотношение крутящий момент/мощность составляет порядка 5,2, что является рекордным показателем для отрасли. Большая работа была проделана в целях избежать увеличения расхода топлива. В результате новые двигатели по топливной экономичности, управляемости и приемистости ничем не уступают своим аналогам в категории Euro 5.

Двигатель может «Scania» Euro 6 принимать нагрузку начиная с 1000 об/мин. Это обеспечивает высокую маневренность автомобиля и возможность езды при частоте вращения двигателя 1100 об/мин и ниже, что позволяет экономить топливо. Для привода колес используется



Scania DC13 Евро 6 SCR

14-скоростная (12+2) трансмиссия с повышающей передачей или без нее. Для облегчения управления автомобилем и обеспечения максимальной экономии топлива рекомендуется использовать полностью автоматическую трансмиссию типа Scania Opticruise.

Возможны также варианты с ручной трансмиссией и с системой Scania Retarder в различных сочетаниях. Scania Retarder совместно с системой автоматического управления трансмиссией Opticruise, тормозом-замедлителем (торможение двигателем) и колесными тормозами обеспечивает возможность управления скоростью транспортного средства во всем диапазоне с помощью кнопки управления и тормозной педали.

В настоящее время двигатели Scania Euro 6 сертифицированы для работы на нескольких стандартных видах топливных смесей, состоящих из дизельного топлива с добавкой до 8 % биодизельного топлива («биодизеля»). Вскоре должны начаться ресурсные испытания системы очистки ОГ при работе на «чистом» биодизеле. В системе SCR расход реагента AdBlue составляет от 3 до 4 % от расхода топлива, что значительно ниже по сравнению с двигателями Scania Euro 5 SCR (5–6 % от расхода топлива).

Новые дизели мощностью 324 и 353 кВт, созданные на базе двигателей Scania с диаметром цилиндра 130 мм, впервые представлены в 2007 г. как Scania Euro 5 EGR.

Чугунный блок цилиндров, с самого начала рассчитанный на давление до 200 бар, остался без изменений. Как и на других двигателях Scania с рабочим объемом 13 л, между блоком цилиндров и картером расположена решетчатая рама, которая не только стабилизирует нижнюю часть двигателя, но и способствует снижению шума и вибрации. Для уменьшения расхода топлива в двигателях применены цилиндрические втулки с

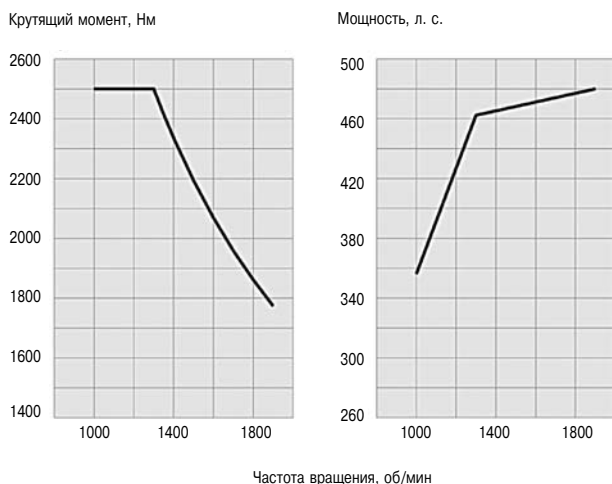
плазменным покрытием, снижающие коэффициент трения, а также стальные поршни с несколько измененной геометрией камеры сгорания, обеспечивающие степень сжатия 17,3:1.

Система вентиляции картера — открытого типа, с пониженным уровнем выбросов. Новый пластиковый поддон, вмещающий на 3 л масла больше, чем предыдущий, отличается более низким уровнем шума и имеет меньший вес. Вес собственно двигателя сохранился таким же, как у Euro 5, но общий вес агрегата увеличился примерно на 200 кг за счет добавления системы SCR с баком AdBlue объемом 75 л и усложнения системы выпуска для реагента. В связи с запуском в производство в 2009 г. новой серии R была увеличена мощность системы охлаждения, отвечающая требованиям конструкции Euro 6. Вентилятор с электронным управлением приводится от коленвала через гидромфту с регулируемой скоростью. Система управления двигателем обеспечивает поддержание оптимальных параметров двигателя и системы очистки ОГ. Для контроля температуры ОГ и концентрации NO_x в различных точках используются датчики, установленные в глушителе. Система управления двигателем, построенная по модульному принципу, используется во всем диапазоне работы двигателя.

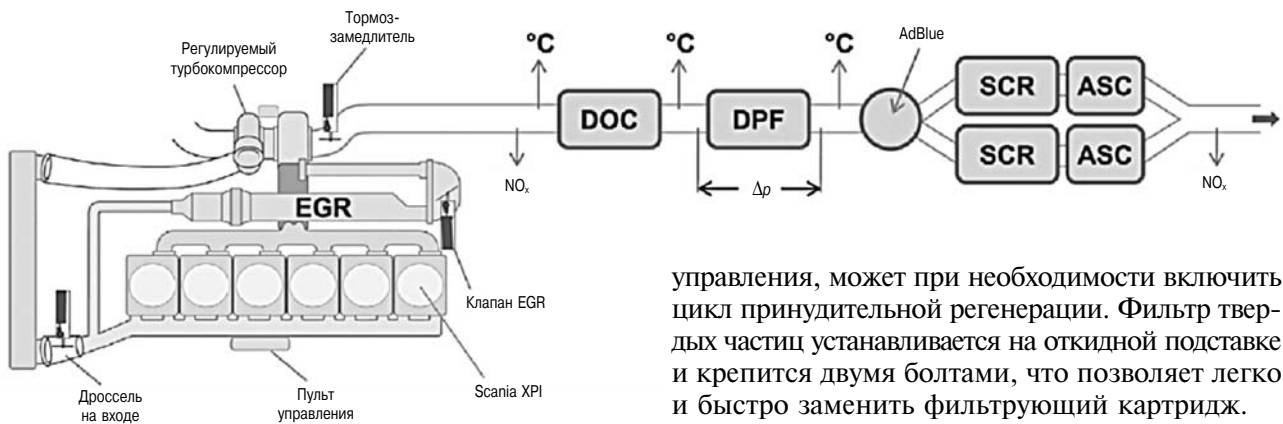
Фирменная система сверхвысокого давления common rail типа XPI способна создавать давление до 2400 бар, но обычно в нормальном режиме она работает при давлении порядка 1800 бар. Форсунки с 8 соплами обеспечивают до трех впрысков за цикл, что позволяет оптимизировать параметры рабочего процесса и показатели вредных выбросов. Система XPI, как и предыдущая система HPI, была разработана совместно с фирмой «Cummins» и производится совместно с «Cummins» в США и в Мексике, но для машин «Scania» она поставляется с завода, расположенного по соседству с Техническим центром «Scania» в г. Sodertälje (Швеция).

На двигателях устанавливается регулируемый турбокомпрессор с изменяемой геометрией, работающий в сочетании с системой EGR и одноступенчатым контуром охлаждения. По словам представителей фирмы, использование регулируемого турбокомпрессора значительно повышает маневренность машины и приемистость двигателя. Степень рециркуляции ОГ достигает до 25 % исходя из условий оптимизации совместной работы систем EGR и SCR. Регулируемые турбокомпрессоры, как и системы очистки топлива, поставляются фирмой «Cummins».

Прецизионное регулирование расхода воздуха на входе осуществляется с помощью дроссельной заслонки, снабженной датчиком положения. Дросселирование воздуха на входе при работе дви-



Скоростная характеристика DC13 110 480 Евро 6



Управляемые узлы и агрегаты двигателя Scania DC13 Euro 6 SCR

гателя на холостом ходу позволяет поддерживать температуру ОГ, оптимальную для работы системы SCR.

Конструкторы фирмы «Scania» создали новую систему дозирования мочевины AdBlue, отличающуюся повышенной точностью, надежностью и герметичностью (что исключает попадание воздуха). AdBlue впрыскивается в смеситель (конструкция которого запатентована), где испаряется, так что в систему из двух параллельных катализаторов SCR попадают уже пары аммиака. Компактный и высокоэффективный катализатор остаточного аммиака (ASC) обеспечивает его полное удаление из отработавших газов. Чтобы легче было поддерживать требуемую температуру, длина тракта испарения AdBlue и образования аммиака сокращена до минимума.

В состав комбинированного глушителя входят компактная изолированная емкость с катализатором сжигания продуктов неполного сгорания топлива (DOC) и полнопоточный фильтр твердых частиц (DPF), за которым расположены два параллельных катализатора SCR и катализатор остаточного аммиака ASC.

Оптимизация показателей выбросов достигается за счет непрерывной координации параметров процессов EGR и SCR. Около половины выбросов NO_x ликвидируется за счет применения системы EGR, а 95 % от оставшегося количества — с помощью системы SCR. Фильтр твердых частиц задерживает порядка 90 % (по массе) выбрасываемых частиц.

Фильтр твердых частиц снабжен двумя датчиками перепада давления. Во время рейса периодически производится регенерация фильтра, которая включается автоматически в случае превышения заданного уровня перепада давления на фильтре. Если при езде в особо тяжелых условиях фильтр все же начнет засоряться сажей, водитель, получив соответствующий сигнал от системы

управления, может при необходимости включить цикл принудительной регенерации. Фильтр твердых частиц устанавливается на откидной подставке и крепится двумя болтами, что позволяет легко и быстро заменить фильтрующий картридж.

Производство компонентов и систем новых двигателей Евро 6, а также самих грузовиков уже началось. Однако собираемые машины считаются предсерийными, поскольку сертификация пока не может начаться из-за временных рамок, установленных регулирующими органами стран-членов ЕС. Ожидается, что до конца лета соответствующие ЕС правила вступят в силу, и еще несколько месяцев потребуются на то, чтобы они были приняты странами-участницами.

Ahead Of Euro 6.

Diesel Progress International Edition,

July-August 2011

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ SCR НА ВНЕДОРОЖНОЙ ТЕХНИКЕ

Оборудование, используемое в строительстве, дорожных работах, горнодобывающей промышленности и сельском хозяйстве, работает, как правило, едва ли не в круглосуточном режиме и в самых тяжелых условиях, которые только можно себе представить. Поэтому параметры надежности и эксплуатационной готовности здесь важны как нигде более.

Любая машина должна прежде всего выполнять работу, для которой она предназначена, но сегодня одного этого уже недостаточно. Необходимо, чтобы машина удовлетворяла при этом жестким экологическим требованиям, которые на данный момент нашли свое отражение в стандарте EPA Tier 4 final, вскоре вступающем в силу в США. И хотя в наше время мало кто сомневается в необходимости защиты окружающей среды, требование одновременного обеспечения нужных технико-экономических показателей и экологической чистоты является трудновыполнимым.

Поэтому создатели двигателей и машин, рассматривая возможные способы очистки отработавших газов, всякий раз пытаются найти наиболее приемлемые для заказчика решения. Это непростая задача, поскольку за каждое достижение приходится чем-то платить. Эксплуатационные расходы, межремонтные интервалы, удобство эксплуатации, характеристики надежности и

пространственные ограничения — вот лишь некоторые факторы, которые должны быть учтены при проектировании.

Очистка отработавших газов от NO_x в системе селективного каталитического восстановления (SCR) — один из способов выполнения требований экологических стандартов, принятый на вооружение такими компаниями, как MTU, «Scania» и «Cummins». SCR обладает рядом несомненных преимуществ, в частности:

- позволяет снизить количество вредных выбросов без значительного увеличения расхода топлива;
- обладает высокой эффективностью очистки от NO_x как на стендах, так и в условиях эксплуатации;
- эта технология проверена временем.

Однако SCR, как и любая технология, имеет свои недостатки.

Машина должна иметь на борту запас водного раствора мочевины (реагента для восстановления NO_x , известного также как AdBlue), уровень которого необходимо поддерживать.

Компоненты системы SCR, такие как баки, катализатор, дозирующие системы и устройства управления, занимают много места (которое в ряде случаев на вес золота), увеличивают вес и сложность оборудования.

Но и это еще не все. AdBlue (32,5 %-ный раствор мочевины в деионизированной воде) замерзает при температуре около $-11\text{ }^\circ\text{C}$ и затем расширяется подобно замерзшей воде. При высыхании она становится твердой субстанцией (растворимой или нерастворимой), обладающей свойством ползучести. И наконец, она может быть коррозионно-активной, что может вызвать повреждение системы SCR и компонентов двигателя.

Большую часть этих проблем удалось решить применительно к грузовикам, на которых SCR применяется (в европейских странах) уже с 2005 г. Однако просто взять систему SCR грузовика и установить ее на погрузчик или экскаватор не получается. Дело в том, что для этих машин характерен гораздо больший уровень вибрации, намного более широкий температурный диапазон и повышенные требования к надежности. Но проблемы, связанные с переносом SCR на внедорожные машины, этим не исчерпываются.

Между прочим, при ближайшем рассмотрении оказывается, что проблема, на первый взгляд представляющаяся наиболее серьезной, а именно — более высокие механические нагрузки, свойственные внедорожной технике — решается проще всего. В большинстве случаев профили нагрузки либо уже известны, либо могут быть с достаточной точностью замерены, что позволяет испытать по отдельности все наиболее критичные компоненты

и усилить их в случае необходимости. Так обычно и поступают.

Несколько сложнее обеспечить необходимый уровень надежности гидравлики самой системы SCR, поскольку выбор значений ускорения, задаваемых при испытаниях, требует глубокого понимания работы как системы, так и всей машины. Здесь, как правило, залогом успеха является работа с хорошо зарекомендовавшими себя поставщиками системы, опирающимися на свой обширный опыт.

Одной из наибольших трудностей является огромное разнообразие внедорожной техники, начиная от стационарных, судовых и тепловозных двигателей и кончая дорожно-строительными и горными машинами. В каждом конкретном случае возникают специфические проблемы, решение которых требует полной свободы при планировании установки системы SCR. Системы, обладающие необходимой гибкостью, используют достаточно сложные датчики, устанавливаемые в зоне впрыска, и насосы, обеспечивающие свободный выбор пространственного положения форсунок.

Чем крупнее двигатель, тем больше возникает проблем, связанных с выбором и проектированием системы SCR. Для мощных двигателей, используемых в дизель-генераторах, горном оборудовании и других машинах, необходим гораздо больший расход AdBlue, чем в самых мощных грузовиках. Поэтому система впрыска топлива должна иметь намного большую производительность, и должна при этом обеспечить нужное качество смеси и ее распределения в выпускном тракте. Простое масштабирование здесь не работает, а требование увеличения периода регламентного обслуживания вступает в противоречие с размерами существующих фильтров.

Изготовители двигателя и машины должны сформулировать и согласовать между собой все технические требования. Задачей изготовителя системы SCR является разработка эффективного технического решения.

Намного сложнее проблемы, связанные со свойствами AdBlue. Дело в том, что водный раствор мочевины может существовать только в ограниченном диапазоне температур. Проблема замерзания AdBlue является достаточно очевидной, и требует применения принципиально новых гидросистем, разработка которых уже ведется.

Однако еще большие трудности, масштаб которых часто недооценивают, связаны с поведением AdBlue при высоких температурах. При температуре свыше $65,5\text{ }^\circ\text{C}$ скорость химического разложения раствора резко возрастает независимо от давления. Длительное нахождение жидкости при температуре $85\text{ }^\circ\text{C}$ уже опасно, а при темпе-

ратуре 132 °С в ней происходит формирование твердых продуктов, способный полностью вывести систему SCR из строя.

Вообще говоря, рабочая температура AdBlue находится в пределах температурного диапазона, свойственного данной машине, и это обстоятельство следует учитывать при проектировании системы. Здесь довольно трудно заранее предложить какие-то готовые решения, поскольку число возможных применений внедорожной техники чрезвычайно велико. Однако можно выделить несколько физических факторов, носящих универсальный характер. К их числу относятся:

➤ **Хорошая изоляция.** Система не нуждается в охлаждении, если к ней не подводится тепло. Поэтому в первую очередь следует обратить внимание на положение форсунки по отношению к выпускной системе, а также на другие источники тепла, расположенные поблизости.

➤ **Эффективное охлаждение.** Независимо от того, какие средства используются для охлаждения форсунки, температура хладагента должна быть ниже критической температуры водного раствора аммиака. Одним из наиболее удачных решений оказалась рециркуляция AdBlue, поскольку температуру в баке, как правило, удается поддерживать на достаточно низком уровне. При наличии эффективной изоляции подвод тепла оказывается настолько малым, что даже небольшой остаток жидкости в системе оказывается достаточным для ее работы.

С другой стороны, возможности использования охлаждающей жидкости двигателя весьма ограничены. Без дополнительного охлаждения она просто окажется слишком горячей и будет на самом деле не охлаждать, а нагревать AdBlue. Применение пассивного охлаждения практически невозможно. Это потребует термостатирования всей зоны вокруг форсунки, что в условиях внедорожной машины нереально.

Нужно сказать, что опасения, связанные с системами SCR, зачастую сильно преувеличены и, как правило, беспочвенны. Вместе с тем применение SCR — далеко не такая простая задача, как может показаться с первого взгляда.

Иначе говоря, внедорожная техника требует особой тщательности при выборе конфигурации и привязке SCR. При условии тесного взаимодействия между поставщиком системы SCR и проектантом двигателя или инженером-эксплуатационником, а также при наличии доброй воли с обеих сторон даже самые амбициозные проекты, на которые отпущено достаточно короткое время, имеют большие шансы на успех.

By Heico Stegmann. The Challenges Of Scr Off-Road Diesel Progress International Edition, July-August 2011

ОДНОЦИЛИНДРОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ HATZ ВЫХОДЯТ НА УРОВЕНЬ TIER 4

Немецкая дизелестроительная фирма «Motorenfabrik Hatz» разработала четырнадцать новых модификаций двигателей, отвечающих требованиям ЕРА Tier 4. Сертификат ЕРА Tier 4 распространяется на все одноцилиндровые двигатели Hatz, входящие в семейства 1В и 1D.

Согласно новым более жестким экологическим нормативам ЕРА Tier 4 выброс твердых частиц для одноцилиндровых двигателей мощностью менее 8 кВт с воздушным охлаждением, непосредственным впрыском и ручным пуском не должен превышать 0,6 г/кВт·ч. При отсутствии ручного пуска выброс частиц не должен превышать 0,4 г/кВт·ч.

К сертификации подготовлены все 16 моделей двигателей, выпускаемых фирмой (на момент написания материала еще не были поданы заявки на сертификацию двигателей 1В20V и 1D90V).

Представители фирмы подчеркивают, что вся работа велась в течение двух с половиной лет собственными силами, без какой-либо внешней помощи.

В период доводки испытательные стенды работали по 24 часа в сутки. За это время фирма сумела запустить новую модель 1D42, пришедшую на смену известному двигателю 1D41.

Необходимость модернизации двигателя 1D41 была продиктована тем, что малый размер его камеры сгорания не давал возможности снизить выброс частиц до уровня 0,6 г/кВт·ч согласно требованиям ЕРА. Поэтому ход поршня был увеличен с 65 до 70 мм.

Небольшое увеличение хода поршня в сочетании с рядом других мероприятий позволило добиться существенного улучшения качества сгорания и рабочих параметров.

Мощность двигателя 1D42 равна 7,0 кВт при 3600 об/мин, что на 1 кВт больше, чем у его предшественника.

Технические решения, принятые для снижения выбросов NO_x, не увеличили расход топлива, хотя обычно это приводит к обратному результату.

Фактически на двигателях 1D42 и 1D50 удалось снизить выброс частиц до величины менее 0,4 г/кВт·ч, что намного ниже разрешенного для двигателей с ручным пуском уровня 0,6 г/кВт·ч.

Для того чтобы выполнить требования ЕРА Tier 4, инженерам «Hatz» пришлось внести конструктивные изменения во все существующие модели. На двигателях 1В эти изменения коснулись, главным образом, системы впрыска, включая плунжер насоса, нагнетательный клапан (рассчитанный на большее давление впрыс-

ка) и форсунку. Была изменена также геометрия поршня и камеры сгорания.

В двигателе 1D50 конструкция цилиндра была изменена полностью. Вместо алюминиевого цилиндра со вставной втулкой применен оребренный цилиндр из серого чугуна в виде моноблока.

Во всех одноцилиндровых двигателях «Hatz» используются распылители специального профиля (RSN — Rate Shaping Nozzles), обеспечивающие увеличение подачи двумя ступенями в течение одного цикла. Это позволило не только уменьшить выбросы негоревшего топлива и NO_x, но и снизить уровень шума.

Одновременно отверстия распылителя уменьшились в диаметре, при этом двигатель стал более чувствителен к загрязнению топлива. Таким образом, вопросы фильтрации топлива вышли на первый план.

На двигателях ряда 1В была применена трехступенчатая система фильтрации топлива, состоящая из фильтра в баке, второго внешнего фильтра и фильтра тонкой очистки. Последний включает в себя лабиринтный фильтроэлемент, обеспечивающий тонкость фильтрации в несколько сотых долей миллиметра.

Система фильтрации подтвердила свою эффективность на протяжении нескольких лет эксплуатации.

С 2010 г. фирма полностью прекратила выпуск дизелей, не соответствующих требованиям ЕРА. Это означает, что новые двигатели с улучшенными экологическими показателями будут поставляться даже в те страны, где требования ЕРА Tier 4 не являются обязательными.

Roberta Prandi. Tier 4 For Hatz One-Cylinders Diesel Progress International Edition, January-February 2011

АВТОБУСЫ НА БИОГАЗЕ

Компания «Volvo» получила заказ на партию газодизельных автобусов, работающих на биогазе.

По словам представителей фирмы, их двигатели будут 30–40 % экономичнее обычных газовых двигателей.

В настоящее время многие шведские города и регионы интенсивно вкладывают средства в производство биогаза для отопления и использования в транспортных двигателях. Поэтому многие автобусы с газовыми двигателями сейчас переводятся на биогаз.

Одним из недостатков таких автобусов является сложная система контроля рабочего процесса, предъявляющая высокие требования к техническому обслуживанию. Газовые двигатели с искровым зажиганием, как и бензиновые двигатели, используют цикл Отто, которым по своему

КПД уступает дизельному циклу. Задачи экономии топлива в глобальном масштабе диктуют необходимость более широкого использования дизельного цикла.

«Volvo АВ» принимает участие в демонстрационном проекте, целью которого является проверка эффективности использования газодизельной технологии в автобусах и грузовиках. При этом используются существующие дизельные двигатели, работающие на топливе, которое в основном (до 70 %) состоит из газа. Шведское энергетическое агентство вложило в этот проект около 2,6 млн Евро.

За основу берется обычный городской дизельный автобус, на крыше которого устанавливаются баллоны с газом. Как и в существующих автобусах с газовыми двигателями, газ не сжигается, а заправка баллонов производится на тех же заправочных станциях. Двигатели оборудуются системой подачи газа, где готовится рабочая смесь с оптимальным соотношением воздух–топливо.

Двигатель работает как обычный дизель, отличаясь от него только меньшим количеством потребляемого дизельного или биодизельного топлива. Основным топливом является газ, а жидкое топливо должно обеспечить его воспламенение.

Подразделение «Volvo Buses» получило от шведской компании «Vargardabuss АВ» заказ на 11 газодизельных автобусов, работающих на метановом топливе, которые должны были поступить в эксплуатацию в июле 2011 г. Первыми на газодизельный цикл переводятся междугородные автобусы типа Volvo 8500.

Фирма «Volvo» уже выпускает низкопольные автобусы типа Volvo7700 с газовыми двигателями. Теперь заказчики имеют возможность приобрести низкопольные автобусы междугородного сообщения с двигателями, работающими по газодизельному циклу, которые сочетают в себе надежность и экономичность дизеля с экологической чистотой, свойственной газовым двигателям.

Bo Svensson. Biogas Bus Heats Up Diesel Progress International Edition, March-April 2011

ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОДИЗЕЛЯ С НАДДУВОМ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПИРОЛИТИЧЕСКОМ ГАЗЕ

Одним из важнейших направлений преодоления топливного дефицита и обеспечения устойчивого развития является использование энергии древесной биомассы и отходов. Это, в частности, приводит к снижению выбросов двуокиси углерода, которая считается причиной глобального потепления. При этом зна-

чительное внимание уделяется утилизации биомассы.

Например, существуют генерирующие установки смешанного цикла, работающие на древесной биомассе и отходах. Такие установки экономически эффективны при условии достаточно большой агрегатной мощности. Однако при малой мощности системы когенерации начальные затраты оказываются относительно велики, тогда как ее термический КПД, напротив, снижается.

Таким образом, выигрыш оказывается не столь велик. Для этого случая больше подходят газовые двигатели, работающие на пирогазе, получаемом из биомассы с помощью пиролиза. Такие двигатели привлекают к себе все большее внимание. Для сжигания пирогаза больше подходят газовые двигатели, превосходящие турбоагрегаты равной мощности по термическому КПД. В состав пирогаза входят водород, окись углерода и нейтральные газы, такие как двуокись углерода и азот, поэтому по калорийности пирогаз уступает минеральному топливу.

Кроме того, состав пирогаза меняется в зависимости от состояния исходного материала и условий газификации. Следовательно, для двигателя с искровым зажиганием работа на таком топливе при больших нагрузках нецелесообразна, так как при этом будет трудно достичь устойчивого сгорания. В последнее время все большее внимание уделяется двигателям, работающим на газе, который воспламеняется с помощью запального жидкого топлива. В таком двигателе, называемом газодизелем, газ в цилиндр поступает через впускное окно, а впрыск дизельного топлива производится вблизи ВМТ. При этом обеспечиваются устойчивое воспламенение смеси от множественных источников и высокая энергия зажигания.

Описание экспериментального стенда и двигателя

Двигатель

Настоящее исследование выполнено на опытном одноцилиндровом двигателе. С учетом возможных вариаций состава пирогаза из биомассы, для испытаний были выбраны четыре типа пирогаза. Для визуализации процесса сгорания использовалась скоростная видеокамера.

Схема опытной установки показана на рис. 1. Для опытов был выбран небольшой одноцилиндровый четырехтактный двигатель с водяным охлаждением, диаметром цилиндра — 96 мм, ходом поршня — 108 мм и степенью сжатия — 16. В камере сгорания плоского типа имеются два впускных и два выпускных клапана, турбулизаторы и галтели отсутствуют. В экспериментах измерялись давление в цилиндре (с помощью датчика Кистлера типа 6052А) и определялась

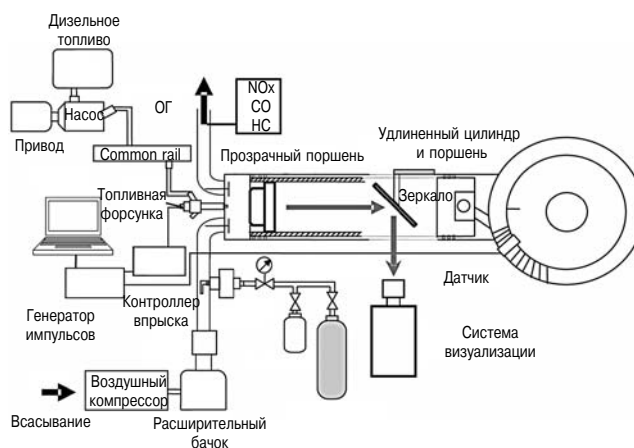
скорость тепловыделения. Калибровка пирогаза производилась методом постоянного давления с использованием небольшой емкости. При этом измерялись величины давления и температуры в емкости, по которым подсчитывалась масса газа. Пирогаз подавался во впускной ресивер через расходомер и смешивался с воздухом. Воздушно-газовая смесь поступала в цилиндр, в который также впрыскивалось небольшое количество дизельного топлива перед ВМТ. Для управления впрыском использовалась система common rail. Давление в системе common rail составляло 40 МПа. Величина циклового впрыска дизельного топлива составляла 2 мг на цикл. Впрыск производился через форсунку с 4 отверстиями диаметром 0,1 мм и углом распыла 140 градусов. Давление подачи смеси изменялось в диапазоне от 101 до 200 кПа. Скорость двигателя равнялась 1000 об/мин. Температура воды и масла в двигателе поддерживалась на уровне 60 °С. Для задания угла начала и длительности впрыска использовались сигналы от датчиков ВМТ и угла поворота коленвала с дискретностью 0,5 градуса. Величины среднего индикаторного давления p_{mi} , коэффициентов вариации p_{mi} и $CV(p_{mi})$, а также индикаторного КПД η_i , определялись по записи давления. Одновременно производились измерения содержания количества NO_x , HC и CO , а также дымности отработавших газов.

Для визуализации процесса сгорания штатный поршень был заменен специальным удлиненным поршнем с сапфировым окном. Съемка факела производилась на высокоскоростную цветную видеокамеру с частотой 8000 кадров в секунду.

Состав пирогаза

Опыты производились с четырьмя разными составами синтетического пирогаза, полученного газификацией древесных отходов (таблица).

Состав пирогаза варьировался с учетом возможного вида исходной биомассы и метода ее газификации. Газ состоял в основном из H_2 , CO , CO_2 и N_2 , с небольшим количеством CH_4 .



Состав пирогаза

	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	Низшая теплотворная способность (МДж/нм ³)
	%					
Тип 1	30,4	23,9	36,6	3,1	6	7,4
Тип 2	22,3	27,6	23,2	2,7	24,2	6,8
Тип 3	13,7	22,3	16,8	1,9	45,3	5,0
Тип 4	14,6	19,4	16	28,9	21,1	14,4

Газы типа 1, 2 и 3 отличаются друг от друга соотношением H₂ и CO. Газ типа 1 содержит больше водорода, а газ типа 2 — больше окиси углерода. Газ типа 3 отличается меньшей теплотворной способностью и пониженным содержанием метана. Газ типа 4 представляет собой газ типа 2, куда добавлен метан, чтобы промоделировать смесь природного и пиролитического газов.

Результаты экспериментов

Влияние давления воздуха на входе

На рис. 2 показаны зависимости давления в цилиндре и скорости тепловыделения от угла ПКВ. Эксперимент проводился с газом типа 2.

При этом значения параметров были следующими: подача дизельного топлива $m_{go} = 2$ мг/цикл, коэффициент избытка горючего $\phi_t = 0,6$, угол начала впрыска дизельного топлива $\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ.

При расчете коэффициента избытка горючего учитываются оба вида топлива — дизельное и пирогаз. Коэффициент избытка горючего $\phi_t = 0,6$ фактически означает диапазон от 0,58 до 0,61. По мере роста давления на входе угол опережения

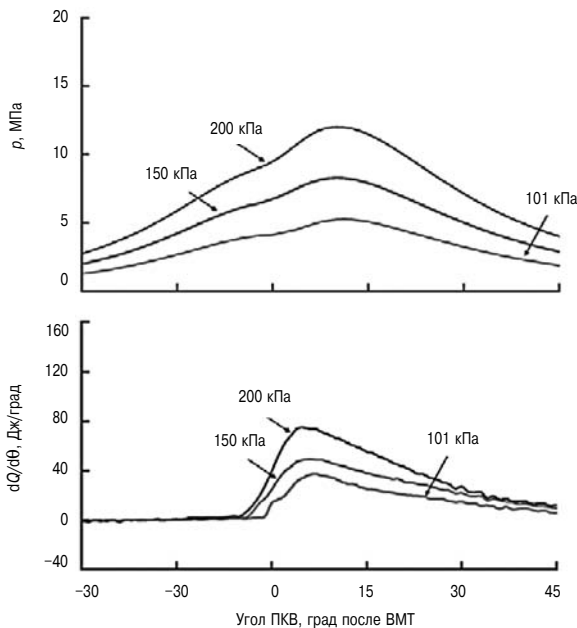


Рис. 2. Зависимость давления в цилиндре и скорости тепловыделения от угла опережения впрыска для газа типа 2 ($\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ, $\phi_t = 0,6$)

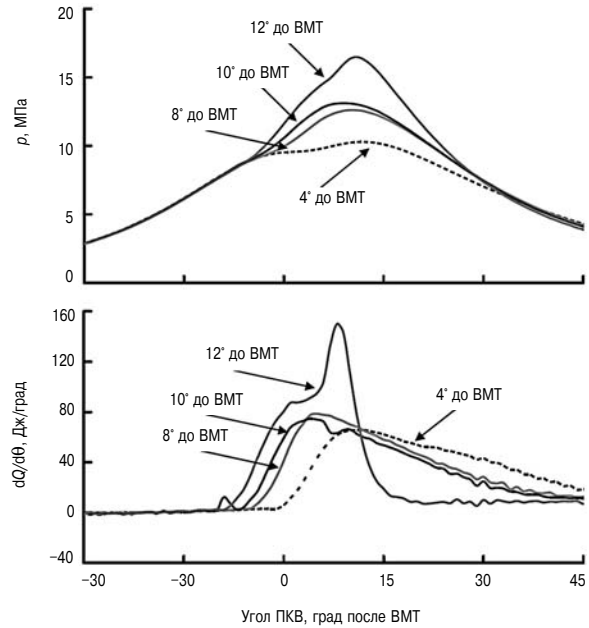


Рис. 3. Зависимость давления и скорости тепловыделения от угла опережения впрыска ($p_{in} = 200$ кПа, $\phi_t = 0,6$)

зажигания уменьшался. Дело в том, что рост входного давления в момент впрыска увеличивает концентрацию кислорода.

Влияние угла начала впрыска

На рис. 3 показано влияние угла опережения впрыска запального топлива на давление в цилиндре и на скорость тепловыделения.

При увеличении угла начала впрыска до 12° до ВМТ, на кривой скорости тепловыделения стали заметны два пика. При дальнейшем увеличении угла началась детонация.

На рис. 4 показано изменение содержания вредных выбросов в отработавших газах при тех же условиях.

Значение НС здесь рассчитано по величине С1. При этих условиях ($m_{go} = 2$ мг/цикл и $p_{inj} = 40$ МПа) дымления не наблюдалось. При увеличении угла опережения впрыска тепловой КПД несколько увеличился, а среднее эффективное давление практически не менялось. Колебания от цикла к циклу не превышали

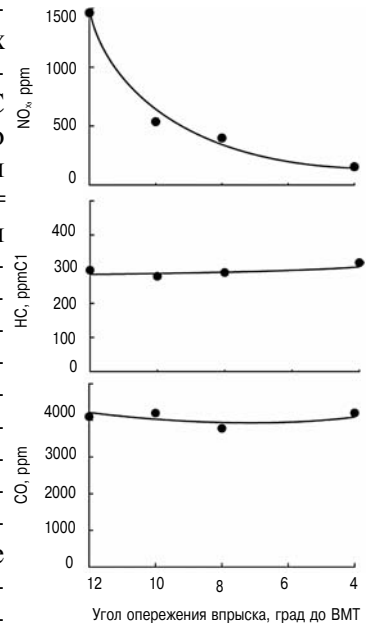


Рис. 4. Зависимость выбросов от угла опережения впрыска ($p_{in} = 200$ кПа, $\phi_t = 0,6$)

процесса сгорания. Зато наблюдался резкий рост содержания NO_x . Содержание HC и CO практически не менялось. Величина CO оставалась высокой.

Влияние состава газа

На рис. 5 показаны кривые изменения давления в цилиндре и скорости тепловыделения для четырех видов топлива при разных значениях коэффициента избытка горючего ($p_{in} = 200$ кПа, $\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ).

Как видно из рис. 5, *a*, увеличение коэффициента избытка горючего ведет к росту давления и скорости тепловыделения. Малая длительность начальной фазы горения объясняется тем,

что в топливе типа 1 содержится больше водорода, поэтому оно горит быстрее. Хотя начало горения при этом слегка задерживается, двигатель может стабильно работать даже при $\phi_r = 0,45$, т. е. на сильно обедненной смеси.

На рис. 5, *b* показаны те же процессы для топлива типа 2, которое содержит значительную долю CO , но меньше H_2 по сравнению с топливом типа 1. Характеристики сгорания аналогичны топливу типа 1. В топливе типа 3 меньше H_2 и CO , но больше N_2 , поэтому его теплотворная способность ниже и оно горит медленнее всех. Тип топлива 4 отличается наибольшим содержанием метана, поэтому оно является самым высоко-

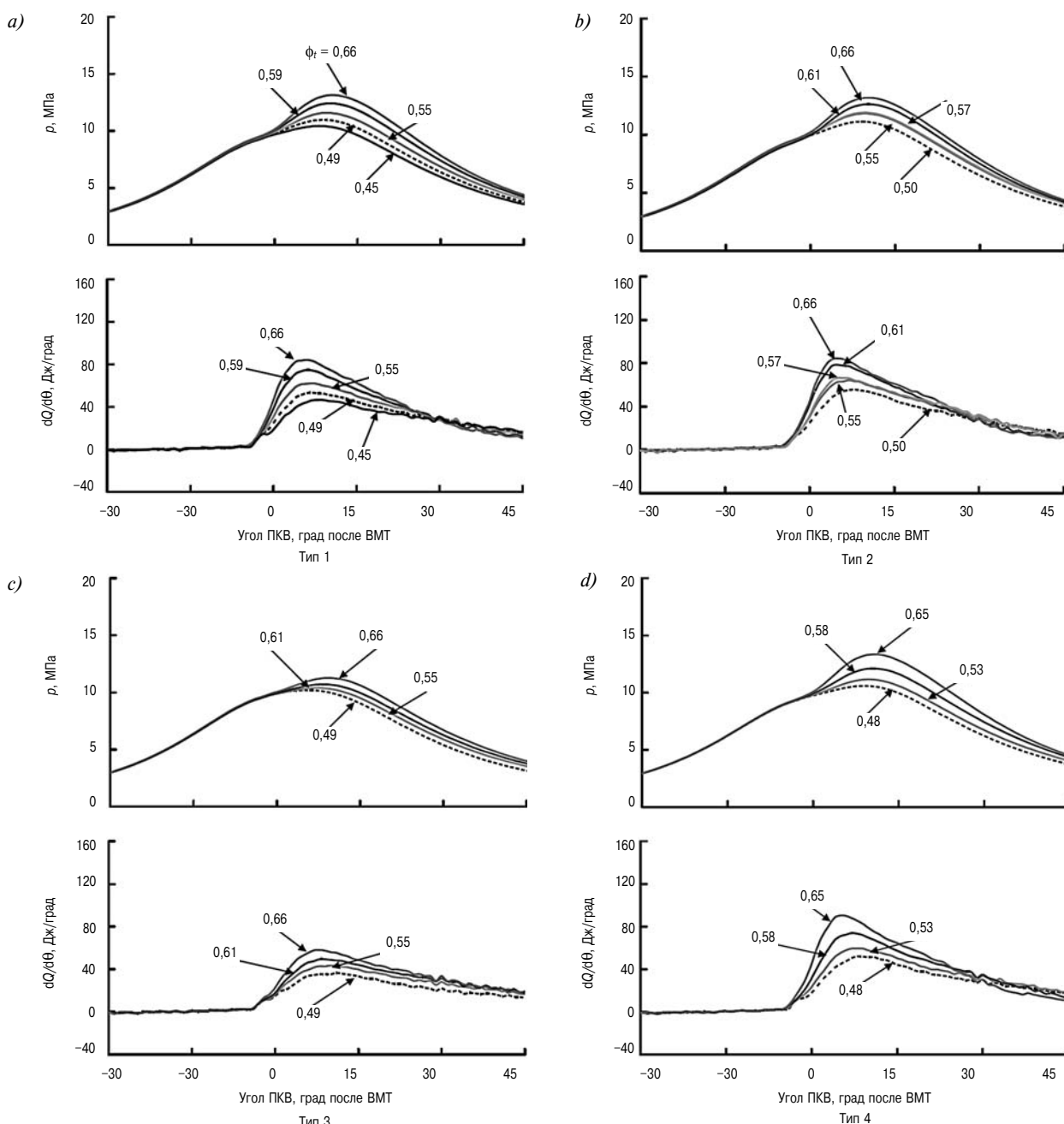


Рис. 5. Зависимость давления и скорости тепловыделения от состава газа 2 ($\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ, $p_{in} = 200$ кПа)

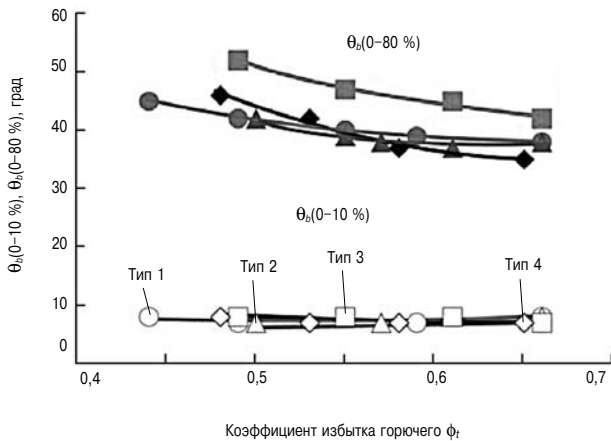


Рис. 6. Зависимость длительности горения запального и основного топлив от коэффициента избытка горючего ($\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ, $p_{in} = 200$ кПа)

калорийным. Процессы в двигателе при работе на топливе типа 4 показаны на рис. 5, *d*. Благодаря присутствию в его составе водорода, оно горит так же быстро, как и топлива 1 и 2.

На рис. 6 показана зависимость длительности горения от коэффициента избытка горючего. Указанные здесь величины длительности сгорания запального и основного топлив — $\theta_b(0-10\%)$ и $\theta_b(10-80\%)$ — означают время сгорания от 0 до 10 % и от 10 до 80 % соответствующих массовых долей. Продолжительность сгорания запального топлива почти не меняется, независимо от значений коэффициента избытка горючего и типа основного топлива. Начальное воспламенение основного топлива вызывается зажиганием от горячей струи дизельного топлива, которое создает множественные очаги возгорания.

С уменьшением коэффициента избытка горючего процесс горения основного топлива замедляется. Однако для топлив типов 1 и 2 (с большим содержанием водорода) длительность горения основного топлива увеличилась незначительно. Длительность горения топлива типа 3 больше, чем у других видов основного топлива, поскольку его калорийность ниже. Что касается топлива типа 4, у которого коэффициент избытка горючего выше 0,6, то длительность его горения была наименьшей в сравнении с остальными. Однако при обеднении смеси длительность его горения становится выше, чем у топлив типов 1 и 2.

Визуализация процесса сгорания

Для визуализации процесса сгорания использовалась скоростная цветная видеокамера, с помощью которой производилась съемка. На рис. 7 показана серия снимков процесса сгорания «чистого» (без пирогаза) дизельного топлива при $\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ и $p_{in} = 101$ кПа. Даже при минимальной цикловой подаче дизельного топлива — 2 мг/цикл его сгорание занимает определенное время. Именно в этом и состоит главная идея газодизеля — создать множественные и мощные очаги воспламенения, отсутствующие при искровом зажигании. На рис. 8 показан процесс сгорания с пирогазом при $\phi_i = 0,6$. На снимках отчетливо виден процесс распространения пламени от четырех крупных очагов, образовавшихся в результате самовоспламенения дизельного топлива.

Четыре очага возгорания (по числу отверстий форсунок) возникали практически одновременно. Когда пирогаз смешивается с воздухом, темпе-

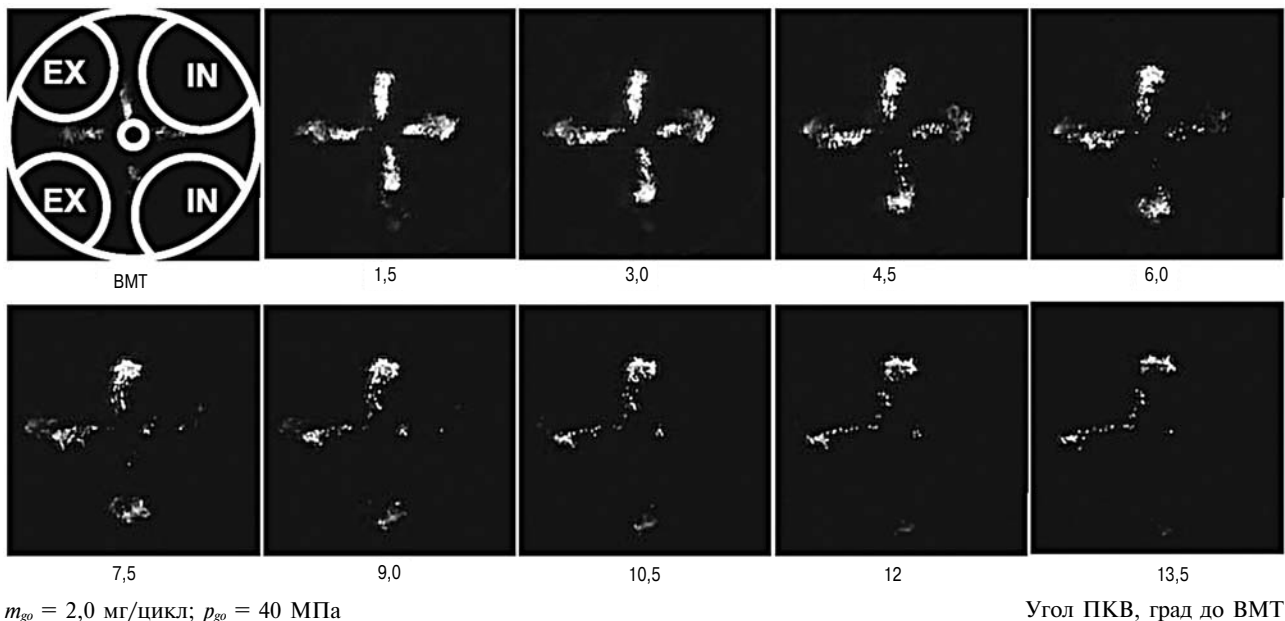


Рис. 7. Кинограмма процесса сгорания запального топлива ($\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ, $p_{in} = 101$ кПа, цикловая подача 2 мг/цикл)

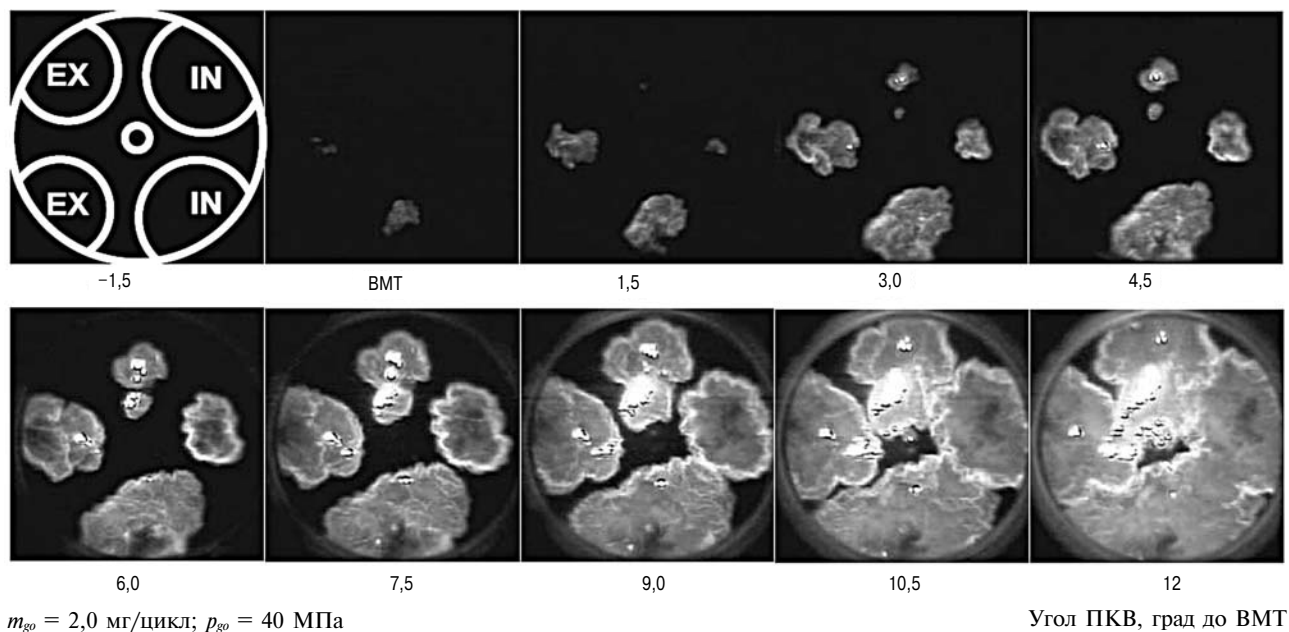


Рис. 8. Кинограмма процесса сгорания горения пирогаза
 ($\theta_{inj} = 8^\circ$ до ВМТ, $p_{in} = 101$ кПа, $\varphi_r = 0,6$, цикловая подача 2 мг/цикл)

ратура смеси в ВМТ оказывается ниже, чем при сгорании только запального топлива, поскольку удельная теплоемкость смеси меньше, чем воздуха. Поэтому запальное топливо в чистом воздухе начинает гореть раньше, чем в смеси. Но независимо от состава смеси струя запального топлива создает множественные мощные очаги возгорания.

Выводы

Выполнено исследование работы одноцилиндрового двигателя газодизеля на четырех видах пиролизического газа. При этом регистрировались параметры рабочего процесса двигателя и концентрация вредных выбросов. Были получены следующие основные результаты:

- Зажигание топливовоздушной смеси инициируется множественными очагами возгорания, образующимися при воспламенении дизельного топлива.

- Двигатель способен работать на всех четырех видах газа при коэффициенте избытка горючего в диапазоне от 0,45 до 0,65 без детонации и пропусков вспышек.

- На топливе типа 1 двигатель может стабильно работать с высоким КПД даже при коэффи-

циенте избытка горючего 0,45, поскольку содержащийся в этом топливе водород расширяет диапазон возможного обеднения смеси. При этом запальное топливо воспламеняется несколько позже, но на стабильности горения основного топлива это не отражается.

- При работе на топливах типа 1 и 2 выбросы NO_x меньше чем на топливе типа 4 ввиду большего содержания в них пассивных газов — азота и двуокиси углерода. Наименьшее количество выбросов NO_x наблюдается при работе на топливе типа 3 с большим содержанием пассивных газов, и низкой теплотворной способностью.

- Выбросы CO во всех случаях достаточно велики, за исключением топлива 4, содержащего метан. Причина этого — низкая температура сгорания из-за наличия пассивных газов и низкой температуры воды.

(конгресс CIMAC 2007, Vienna)

*Mr. Eiji Tomita, Mr. Nobuhiko Fukatani,
 Mr. Nobuyuki Kawahara, Mr. Keiji Maruyama,
 Okayama University, Japan
 Mr. Tetsuo Komoda,
 Mitsui Engineering and Shipbuilding, Co., Ltd.,
 Japan*