

Магистры (Лекции)

Методы улучшения экологических характеристик ДВС

ВВЕДЕНИЕ К КУРСУ ЛЕКЦИЙ

Актуальность дисциплины «Методы улучшения экологических характеристик ДВС» определяется ее направленностью на решение одной из наиболее важных глобальных проблем современности - загрязнению окружающей среды вредными выбросами с отработавшими газами как транспортных средств (автомобили, самоходная сельскохозяйственная и лесная техника, строительно-дорожные и коммунальные машины, железнодорожный, речной, морской и авиационный транспорт), так и стационарных установок, в составе которых используются двигатели внутреннего сгорания (генераторные установки, водяные насосы, воздушные компрессоры, сварочные агрегаты, цементовозы и т.д.). Социальная значимость дисциплины обуславливается условиями эксплуатации указанных объектов, в основном, в густонаселенных районах, создавая негативное воздействие на людей, животных, растительность и строения.

Дисциплина «Методы улучшения экологических характеристик ДВС» относится к профессиональному циклу дисциплин и профилю «Двигатели внутреннего сгорания». Поскольку в процессе изучения этой дисциплины студенты знакомятся со способами организации малотоксичного рабочего процесса поршневых ДВС и методами обработки отработавших газов, то студенты должны владеть знаниями о причинах образования вредных веществ при горении топлива и масла в ДВС, зависимости состава отработавших газов ДВС от режима работы, методах воздействия на различные вредные вещества как в ходе рабочего процесса двигателя, так и при обработки потока отработавших газов; также студенты должны владеть методами получения, хранения и переработки информации, быть готовыми использовать компьютерные программы, как средства работы с информацией.

Кроме того, студенты в процессе изучения дисциплины осваивают приемы и методы построения графиков на ПЭВМ, определяют и анализируют значения

полученных показателей. Получаемые при изучении дисциплины «Методы улучшения экологических характеристик ДВС» знания будут базироваться на знаниях, полученных при изучении цикла естественных наук (химия) и профильных дисциплин: теория ДВС (рабочие процессы), агрегаты наддува двигателей, основы горения углеводородных топлив том числе и при выполнении курсовых проектов по этим дисциплинам; а также при проведении итоговой государственной аттестации (выполнении и защите выпускной работы) и в период обучения в магистратуре и работе по специальности.

Поэтому преподавание этой дисциплины должно проводиться после изучения модуля таких профильных дисциплин как устройство и работа поршневых двигателей, теория рабочих процессов поршневых двигателей, основы горения углеводородных топлив.

Целями освоения дисциплины «Методы улучшения экологических характеристик ДВС» являются:

- обеспечение научной, технической и социальной политики в области охраны окружающей среды;
- повышение профессионализма и компетентности в области осуществления мероприятий по техническому совершенствованию источников загрязнения окружающей среды и по воспроизводству природной среды.

Задачи дисциплины: получение знаний по развитию исследований, связанных со снижением загрязнения окружающей среды отработавшими газами поршневых двигателей, в области:

- современной отечественной и международной нормативно-технической документации, касающейся природоохранного нормирования ДВС;
- методов оценки экологического уровня двигателей внутреннего сгорания при проведении испытаний на моторных стендах;
- мероприятий по улучшению экологических характеристик ДВС за счет организации рабочего процесса и применению средств дополнительной обработки отработавших газов.

Особенности авторского подхода определены более чем 35-летним стажем работы автора по указанной проблеме как в системе научно-исследовательского института (НИКТИД, г. Владимир, 24 года), так и на производстве («Владимирский тракторный завод», 10 лет), а также обучения в очной аспирантуре Московского автомобильно-дорожного института (3 года); тематика кандидатской (1982 г.) и докторской (2006 г.) диссертаций автора связаны с решением задачи снижения выброса вредных веществ с отработавшими газами дизелей.

При изучении дисциплины «Методы улучшения экологических характеристик ДВС» большую роль играет самостоятельная работа студентов, которая в первую очередь должна быть направлена на ознакомление с помощью Интернета с современными данными в указанной области, получаемыми в различных ведущих фирмах зарубежных стран, с современными требованиями международных и национальных нормативных документов.

ЛЕКЦИЯ №1. ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Фоновая концентрация вредных веществ
2. Передвижные и стационарные источники вредных веществ
3. Парниковый эффект
4. Стандартизация требований к экологическому уровню двигателей

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Фоновая концентрация вредных веществ

Воздух – это механическая смесь газов, образующих газообразную оболочку Земли. Состав сухого воздуха (без паров воды) на уровне моря следующий (в процентах по объему): азот – 780,%, кислород – 20,99%, аргон – 0,94%, углекислый газ, водород, неон, гелий, криптон и ксенон в сумме – менее 0,5%.

Естественный (природный) состав атмосферы определяется, в первую очередь, наличием в ней кислорода и азота. Присутствие в атмосфере других веществ обусловлено как природными явлениями (разрядами молний, пожарами, пылевыми бурями...), так и антропогенными факторами (выбросами от промышленных и сельскохозяйственных предприятий и транспортных средств).

Кроме нейтральных веществ, в воздухе содержатся и вредные вещества (ВВ) – вещества, которые оказывают негативное воздействие на жизнедеятельность живых организмов и состояние объектов природного и антропогенного (т.е. вследствие деятельности человека) происхождения: горные массивы, почву, воду, леса, строения.

Сочетание вредных химических соединений природного и антропогенного возникновения носит название фоновой концентрации загрязняющих веществ. Фоновая концентрация загрязняющих веществ - это количество загряз-

няющих веществ, содержащихся в единице объема природной среды, подверженной антропогенному воздействию.

2. Передвижные и стационарные источники вредных веществ

Загрязнение атмосферы населенных пунктов происходит, в основном, вследствие выбросов вредных веществ, содержащихся в отработавших газах двигателей транспортных средств (ТС) и промышленных газах стационарных предприятий. При этом концентрация ВВ в атмосфере определяется не только их выбросом, но и степенью их поглощения растительностью, разбавлением воздухом, временем осаждения на землю и т.п.

Основным источником поступления вредных веществ в природную (окружающую) среду от транспортных средств являются отработавшие газы (ОГ) двигателей. Кроме них источником ВВ являются картерные газы и пары топлива, а также продукты износа шин и тормозов, электролит аккумуляторных батарей, тормозная жидкость, масла. Однако, в первую очередь, выброс ВВ в атмосферу – это результат сжигания топлива в цилиндрах двигателя.

Концентрация ВВ в отработавших газах зависит от режима работы двигателя, т.е. характера движения ТС, который, в частности, обуславливается особенностями транспортных магистралей (в т.ч. качеством покрытия), дорожными разметкой и знаками, а также интенсивностью транспортных потоков, различными для разных населенных пунктов. Соответственно, подобные характеристики, в идеале, должны бы учитываться при установлении норм на выброс ВВ с отработавшими газами ТС для каждого населенного пункта.

Попадая в атмосферу, ОГ перемешиваются с воздухом, соответственно их концентрация в единице объема смеси воздуха и отработавших газов становится меньше, чем в чистых ОГ. Однако результирующее содержание ВВ в воздухе может колебаться в достаточно широких пределах, поэтому и их влияние на окружающую среду, в том числе и на человека различно. Существует понятие предельно-допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ. ПДК в воздухе населенных мест – это концентрации, которые при постоянном воздействии в

течение всей жизни человека не могут оказать вредного воздействия на здоровье человека. При этом регламентируется максимальное разовое (мр) и среднесуточное (сс) содержание ВВ в воздухе.

3. Парниковый эффект

Парниковый эффект - явление вторичного нагрева атмосферы длинноволновым (инфракрасным) излучением от поверхности планеты, возвращаемым обратно к поверхности некоторыми газами, находящимися в атмосфере. Этот эффект определяется разностью между средней температурой поверхности планеты (плюс 15°C) и ее радиационной температурой в космосе (минус 18 °С). Соответственно парниковый эффект равен плюс 33 °С. При усилении парникового эффекта температура поверхности растет при сохранении постоянной радиационной температуры.

Данный эффект вызывается наличием в атмосфере ряда газов, которые получили название парниковых газов (ПГ). К ним относят: диоксид углерода CO₂, метан CH₄, закись азота N₂O, гидрофторуглероды HFC, перфторуглероды PFC и гексафторид серы SF₄.

Несмотря на наименьшую парниковую активность, наибольшее влияние на создание парникового эффекта оказывает диоксид углерода, массовый выброс которого в атмосферу наибольший - 68% от суммарного выброса всех ПГ; На долю CH₄ приходится 21%, N₂O – 10%, на остальные – 1%. Водяные пары (так же как и CO₂ являющиеся продуктом сгорания топлива вследствие наличия в топливе водорода) не отнесены к парниковым газам, хотя они обладают более сильным по сравнению с CO₂ свойством поглощать инфракрасное излучение.

В 1992 г. в Рио-де-Жанейро на заседании Международного комитета ООН по окружающей среде был принят текст Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК), в которой, в частности, было отмечено, что климат на Земле меняется, при этом тенденция заключается в повышении средней глобальной температуры. За период инструментального определения температуры атмосфера планеты с 1860 г. увеличилась на 0,6±0,2 °С; в том числе за последние 25

лет - на $0,25 \pm 0,05$ °C. На этом заседании члены обязались к 2000 г. сократить выброс всех газов (в пересчете на CO₂) до уровня 1990 г. В 1997 г. (в Киото) на третьей конференции стран-участниц РКИК было принято дифференцированное решение по допустимому уровню выбросов CO₂ каждой страной, т.е. были приняты нормы (квоты) выбросов. Этот документ известен как Киотский протокол. Срок ввода в действие Киотского протокола был обусловлен сроком его ратификации странами-участниками РКИК, на долю которых приходится не менее 55% от суммарного выброса ПГ. После того, как в 2005 г. Россия (на ее долю приходится 17% мировых выбросов CO₂) ратифицировала этот протокол, последний вступил в действие. Цель данного документа - сократить вредное влияние человеческой деятельности на состояние окружающей среды, выражающееся в интенсификации глобального потепления.

В этом протоколе расписаны механизмы достижения цели:

- механизм “чистого развития”. В этом случае страны проводят мероприятия по снижению выбросов ПГ за счет модернизации своих предприятий и увеличения площадей естественных поглотителей ПГ на своей территории (например, лесопосадок, 1 га которых обеспечивает поглощение CO₂ до 10 т в год);

- механизм “совместного сотрудничества”. В этом случае высокоразвитые страны помогают развивающимся странам внедрить в производство современные технические решения, обеспечивающие снижение выброса ПГ. При этом величина снижения выброса ПГ засчитывается на счет развитых стран, которые благодаря этому могут решать проблемы выполнения своих квот;

- “торговля квотами на ПГ”. В том случае, если какая-либо страна имеет положительный баланс по выбросам ПГ (т.е. действительный уровень выбросов с учетом естественного поглощения меньше квоты), то эта страна может продать любому другому государству право на дополнительный выброс ПГ в том же объеме.

Однако ряд стран не ратифицировали этот протокол; а это США (на долю которых приходится 36% мировых выбросов CO₂), Китай, Бразилия, Индия и

ряд других, которые посчитали, что это приведет к ограничению развития экономики.

4. Стандартизация требований к экологическому уровню двигателей

В 1943 г. в Лос-Анжелесе (США) впервые отметили появление на улицах города смога; в декабре 1952 г. в Лондоне (Великобритания) также возник смог, в результате чего в течение двух недель погибло более 4000 человек. В 1963 г. в США был принят “Закон о чистом воздухе” – документ, ограничивающий выбросы в атмосферу вредных веществ с отходящими газами промышленных предприятий; в 1970 г. документ был дополнен аналогичными положениями, касающимися автотранспорта.

В настоящее время стандарты, регламентирующие содержание ВВ в отработавших газах транспортных средств и ДВС, приняты во многих странах. В России - это государственные стандарты (ГОСТ Р...), которые объединены в Технические регламенты, например:

- специальный Технический регламент "О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ", согласно которому все транспортные средства делят на 5 экологических классов;

- специальный Технический регламент “О безопасности машин и оборудования” и другие.

Кроме того, на территории трех стран, входящих в Таможенный союз (кроме России это Белоруссия и Казахстан), действуют общие Технические регламенты таможенного союза.

С целью обеспечения возможности сравнения между собой результатов испытаний, проведенных в разных странах, в мире идет процесс согласования (унификации, гармонизации) стандартов различных стран и организаций, и в перспективе следует ожидать единые стандарты для всего мира для одних и тех же объектов.

В связи с постоянным ростом численности ТС во всех странах мира, требования к предельно-допустимому содержанию вредных веществ в ОГ двигателей и транспортных средств периодически пересматриваются в сторону ужесточения, что заставляет производителей двигателей и транспортных средств постоянно совершенствовать свою продукцию.

ЛЕКЦИЯ №2. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА И МАСЛА В ДВС

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Химический и элементный состав топлив и масел
2. Состав продуктов горения

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Химический и элементный состав топлив и масел

Образование вредных веществ – результат сжигания топлива в цилиндре двигателя. Основным различием всех топлив как источника химической энергии (независимо от вида происхождения и агрегатного состояния) является их элементный и химический составы, определяющие количество выделяемой энергии в виде тепла при сгорании единицы количества топлива.

Под элементным составом понимается содержание в топливе химических элементов. В зависимости от типа топлива элементов может быть от двух до пяти; углерод С, водород Н, сера S, кислород О и азот N. Под химическим составом понимается содержание в топливе различных химических компонентов. Последние подразделяются на два типа: горючую массу и балласт. К горючей массе относятся углеводороды различного состава C_nH_m и сера S, т. е. то, что при горении выделяет тепло. Балласт — это все остальное: азот, кислород, вода, минеральные составляющие, т. е. все то, что при горении топлива отбирает тепло на свое сгорание (кислород) или же вообще не горит (азот и минеральные вещества), но занимает долю в массе топлива. Наличие балласта приводит к снижению тепловыделения при горении топлива, поскольку фактическое количество последнего определяется только количеством углерода, водорода и серы (табл.П1.10, прил.).

При нормальных атмосферных условиях (соответствуют состоянию окружающей среды 760 мм рт.ст. и 0 °С) углеводороды различных групп, входящие в топливо, находятся в разных агрегатных состояниях. Группы с углеродным числом $C_1...C_4$ (метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и их про-

изводные: метилен CH_3 , этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 , бутилен C_4H_8 и др.) – в газообразном состоянии, $\text{C}_5 \dots \text{C}_{15}$ (начиная с гептана C_5H_{12}) – в жидком (при этом $\text{C}_5 \dots \text{C}_6$ – легкоподвижные, а $\text{C}_{15} \dots \text{C}_{17}$ – маслянистые жидкости), с углеродным числом от C_{18} и выше – в твердом. Бензины состоят из углеводородов групп $\text{C}_5 \dots \text{C}_{11}$, температура кипения которых лежит в диапазоне $40 \dots 200$ °С; лигроины – из групп $\text{C}_8 \dots \text{C}_{14}$ ($150 \dots 250$ °С); керосины – из групп $\text{C}_{12} \dots \text{C}_{18}$ ($180 \dots 300$ °С); газойль (на основе которого делается дизельное топливо) из групп $\text{C}_7 \dots \text{C}_{35}$ ($200 \dots 370$ °С).

В общем виде состав топлива – “ $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_r\text{S}_k\text{N}_l + \text{Ми}$ ”. В первом слагаемом отражено наличие пяти основных химических элементов: углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S и азота N. Индексы (x, y, r, k и l) отражают соотношение элементов в молекуле топлива. Второе слагаемое – минеральные составляющие, которые присутствуют только в жидких и твердых топливах. Причина их наличия - природное происхождение топлива.

Из пяти химических элементов топлива основными являются углерод и водород. При сгорании 1 кг углерода С в виде графита выделяется около 34,0 МДж тепла при н.у. При этом максимальная температура, развиваемая при отсутствии потерь тепла (*адиабатическая температура*), равна 2175 °С при сгорании в сухом воздухе и 2145 °С при сгорании в воздухе, содержащем 1% влаги. В различных видах топлив углерод имеет разные типы химических связей с другими элементами, поэтому количество тепла, выделяемого при горении углерода, непостоянно вследствие разных затрат энергии на разрыв связей между атомами и молекулами в этих соединениях.

При сгорании 1 кг *газообразного* водорода H_2 выделяется около 142,0 МДж тепла при н.у., т. е. в четыре с лишним раза больше, чем при сгорании углерода. Поэтому теплота сгорания топлива возрастает с увеличением содержания в нем водорода, и такой показатель, как отношение “углерод / водород”, является важным для анализа энергоемкости топлив. Так же как и при сгорании углерода, для различных топлив количество выделяющегося тепла при сгорании водорода различно в связи с разным характером химических связей водорода. Поэтому при сгорании жидких топлив теплота сгорания водорода

составляет уже, приблизительно, 125,0 МДж на 1 кг водорода. Адиабатическая температура горения водорода равна 2235 °С при сгорании в сухом воздухе и 2200 °С при сгорании в воздухе, содержащем 1% влаги.

2. Состав продуктов горения

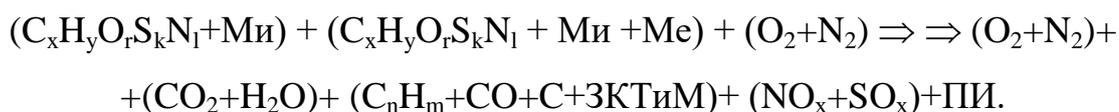
В камере сгорания поршневых ДВС горит не только само топливо, но и часть смазочного масла, попадающего туда со стенок цилиндра, что определяет “расход масла на угар”. Состав смазочного масла отличается от состава топлива наличием оксидов металлов (Me), входящих в различные присадки к маслам: моющие, антикоррозионные, противопенные, антиокислительные, нейтрализующие и т.д. Поэтому в общем виде состав масла – “ $C_xH_yO_rS_kN_l + Ми + Me$ ”.

Состав окислителя (воздуха) – “ O_2+N_2 ”. В случае разбавления воздуха продуктами сгорания последние входят в состав окислителя.

Таким образом, реакция окисления топлива и смазочного масла в общем виде имеет следующий вид:



Или, учитывая состав топлива, смазочного масла и окислителя, можно записать:



В состав продуктов горения (а соответственно, и в отработавшие газы) входят:

$O_2 + N_2$ – остаточные (т.е. полностью не использованные) кислород и азот воздуха;

$CO_2 + H_2O$ – продукты полного сгорания топлива: диоксид углерода и вода;

$C_nH_m + CO + C + ЗКТиМ$ – продукты неполного сгорания топлива и масла:

суммарные углеводороды, оксид углерода, сажа, а также зола и кокс топлива и масла;

$\text{NO}_x + \text{SO}_x$ – продукты окисления азота (в основном, входящего в состав воздуха) и серы.

ПИ - продукты износа деталей двигателя.

Количество остаточного кислорода определяется, в первую очередь, типом рабочего процесса. В ДВС с принудительным воспламенением (бензиновые и газовые двигатели) состав топливовоздушной смеси близок к стехиометрическому, и коэффициент избытка воздуха находится в пределах $\alpha = 0,85 \dots 1,15$. В итоге, концентрация кислорода в ОГ обычно не превышает 2,0...3,0% (по объему). В дизелях содержание O_2 в ОГ зависит от наличия наддува и режима работы. На режиме холостого хода концентрация кислорода достигает 18% по объему (при исходной концентрации кислорода в воздухе 21%), а на режимах полной нагрузки – от 5,0...7,0% для ДВС со свободным впуском воздушного заряда до 10,0...13,0% для двигателей с наддувом.

Количество азота в ОГ практически равно его концентрации в воздухе (т.е. порядка 79% по объему), поскольку в реакциях горения N_2 не участвует. Добавка за счет азота, содержащегося в топливе незначительна, т.к. его концентрация в топливе не превышает 5,0% (и то только в тяжелых топливах, а в дизельном и бензине его нет).

Количество продуктов полного сгорания – диоксида углерода и паров воды – пропорциональна расходу топлива: источник CO_2 – углерод топлива, а источник H_2O – водород топлива.

Наличие в ОГ продуктов износа деталей двигателя обусловлено износом трущихся пар: “цилиндр-поршень”, “коленчатый вал-вкладыши”, “стержень клапана-направляющая втулка”, пары шестерен.... ПИ попадают в масло, а вместе с маслом по стенкам цилиндра – в КС. Их содержание в ОГ ДВС определяется, в основном, техническим состоянием двигателя.

Содержание различных веществ (твердых, жидких и газообразных, как вредных, так и безвредных) в отработавших газах ДВС характеризуется следующими значениями .

**Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания
(процент по объему)**

| Компонент | Химическая формула | Двигатели | |
|-----------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| | | с принудительным воспламенением | с самовоспламенением от сжатия |
| Азот | N ₂ | 74...77 | 74...78 |
| Кислород | O ₂ | 0,3...10,0 | 5,0...18,0 |
| Водяной пар | H ₂ O | 3,0...5,5 | 0,5...9,0 |
| Диоксид углерода | CO ₂ | 5,0...12,0 | 1,0...10,0 |
| Оксид углерода | CO | 0,5...12,0 | 0,005...0,2 |
| Оксиды азота* | NO _x | 0,01...0,80 | 0,004...0,4 |
| Суммарные углеводороды* | C _n H _m | 0,2...3,0 | 0,007...0,15 |
| Дисперсные частицы, г/(кВтч) | PM | Нет данных | 0,1...3,0 |
| Сажа, г/м ³ | C | До 0,004 | 0,01...1,1 |
| Оксиды серы* | SO _x | До 0,008 | 0,002...0,02 |
| Оксиды свинца | PbO | До 0,02 | Отсутствуют |
| Метан | CH ₄ | до 80% от C _n H _m в случае использования в качестве топлива природного газа, в других случаях - не более 2% от C _n H _m | |
| Альдегиды | RCHO | До 0,2 | 0,001...0,009 |
| Бенз(α)пирен, мкг/ м ³ | C ₂₀ H ₁₂ | До 25 | До 10 |

Примечания и обозначения: 1. жирным шрифтом выделены безвредные вещества; 2. в ОГ двигателей содержатся также соединения свинца, кремния, меди, кальция, цинка, фосфора, марганца, хрома, натрия, бария, железа, никеля и ряда других веществ, входящих в состав присадок смазочного масла, либо являющиеся продуктами износа деталей двигателя, и попадающие в цилиндры вместе со смазочным маслом. * - оксиды азота в пересчете на NO₂, углеводороды – на CH₄, сернистые соединения – на SO₂.

Характер воздействия вредных веществ на человека определяется уровнем концентрации вещества в атмосфере, степенью токсичности вещества, а также продолжительностью воздействия

ЛЕКЦИЯ №3. ОКИСЛЕНИЕ АЗОТА ВОЗДУХА И СЕРЫ ТОПЛИВА

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Термический, быстрый и топливный оксиды азота
2. Механизм окисления серы топлива

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Термический, быстрый и топливный оксиды азота

Оксиды азота NO_x – это продукт окисления азота воздуха кислородом воздуха при условии высоких температур (свыше 2000 °С). При горении в КС образуется, в основном, оксид азота NO , который частично (не более 5%) окисляется до диоксида азота NO_2 . На образование NO и NO_2 расходуется не более 0,1% азота воздуха.

Различают три возможных пути образования оксида азота NO при горении топлив.

В результате окисления азота воздуха кислородом воздуха под воздействием высоких (не менее 2000 К) температур образуется термический оксид азота т.е. реакция идет в зоне продуктов сгорания. При этом ни химический состав топлива, ни величина давления в КС непосредственного влияния на процесс окисления азота не оказывают – все определяется уровнем температур. Если в топливе имеются азотсодержащие соединения, то азот высвобождается при сравнительно низких температурах с образованием топливного оксида азота. При столкновении углеводородных радикалов с молекулой азота в зоне реакции горения (во фронте пламени) образуется быстрый оксид азота. В этом случае количество образующегося NO пропорционально давлению.

Основная роль принадлежит термическим оксидам азота; роль двух других источников по мере повышения температур и давлений при горении уменьшается. А для условий горения в ДВС, где при сгорании углеводородо-воздушных смесей (содержащих крайне незначительное количество азота в то-

пливе) развиваются достаточно высокие температуры (2000...2800 К), термический механизм носит решающий характер [7, 22, 24, 32, 36...40].

Образование термического оксида азота происходит по цепному механизму согласно двум основным реакциям (*механизм акад. Н.Н. Семенова*):



Скорость образования оксида азота лимитируется первой эндотермической реакцией. Потребление атома кислорода O^* в первой реакции восполняется его образованием во второй реакции благодаря тому, что атом азота N^* , образовавшийся в первой реакции, тут же реагирует с молекулярным кислородом, что приводит к регенерации активного атома кислорода. Указанные реакции протекают в обе стороны; значения констант скоростей прямой и обратной реакций зависит от температуры, при которой происходит реакция.

Содержание оксида азота в продуктах сгорания зависит от температуры горения, содержания кислорода в продуктах сгорания (содержание азота в продуктах сгорания практически постоянно, так как обусловлено его концентрацией в воздухе), эффективного объема образования и подвижности реакции образования. Последнее обстоятельство особенно важно при охлаждении продуктов сгорания как за счет выноса их из зоны горения, так и за счет увеличения объема камеры сгорания на такте расширения.

В виду термической природы механизма окисления азота, наиболее общими факторами, действующими в поршневых ДВС, сказывающимися на закономерностях изменения температурного поля, являются процесс сжатия – расширения и Махе-эффект.

Процесс сжатия – расширения, определяющий изменение объема КС, обуславливает изменение давления и, соответственно, общего температурного фона, что сказывается на скорости охлаждения продуктов сгорания. Таким образом, при сжатии температуры повышаются, а при расширении – понижаются. Определенное влияние оказывает соотношение момента достижения поршнем

верхней мертвой точки (при котором достигается максимальное давление сжатия) и момента достижения максимального давления сгорания.

При отсутствии горения сам процесс сжатия не может вызвать образования оксида азота, так как температура воздушного заряда в КС в этом случае недостаточна - порядка 1000 К. Процесс расширения способствует более резкому охлаждению продуктов сгорания по сравнению с естественным охлаждением при неизменном объеме.

Махе-эффект - это непрерывное повышение давления при распространении фронта пламени в замкнутом объеме, что приводит к существенным различиям в температурах (до 500 К) в разных зонах продуктов сгорания. Махе-эффект существенно увеличивает среднюю скорость реакции окисления азота вследствие большой энергии активации реакции образования оксида азота даже при неизменной средней температуре продуктов сгорания в КС.

Способность реакции окисления азота следовать за равновесным составом по условиям концентрации реагентов и величине температуры называется подвижностью реакции образования оксида азота. Если это условие выполняется, то имеет место высокая подвижность, если же нет - то малая подвижность

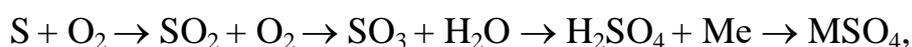
В случае сгорания предварительно перемешанных топлива и окислителя, образование NO происходит во всем объеме камеры сгорания (так как смесь, а соответственно и зона продуктов сгорания с высокой температурой занимают весь объем КС). Характерным в данном случае является то, что концентрация остаточного кислорода постоянна по всему объему. Поэтому скорость разложения образовавшегося NO определяется только интенсивностью охлаждения продуктов сгорания.

В двигателях с внутренним смесеобразованием величина зоны образования NO обусловлена, во-первых, размерами фронта пламени, который, в свою очередь, зависит от площади топливного факела, т.е. от величины цикловой подачи топлива. А во-вторых, зона образования NO в сечении, перпендикулярном поверхности фронта пламени, ограничена значением температуры продуктов сгорания выше 2000 К. Таким образом, эффективный объем образования NO –

это объем зоны продуктов сгорания, обусловленный приведенной поверхностью диффузионного фронта пламени (идентифицируемой с величиной изостехиометрической поверхности) и толщиной зоны температур, при которой возможно протекание реакции окисления азота воздуха остаточным кислородом, содержащимся в продуктах сгорания.

2. Механизм окисления серы топлива

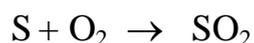
Процесс сгорания серы S, содержащейся в топливе, проходит через ряд стадий с образованием промежуточных продуктов:



где SO_2 и SO_3 – сернистый и серный ангидриды, H_2SO_4 – серная кислота.

Особенности протекания указанных стадий следующие:

- при температуре свыше $1400\text{ }^\circ\text{C}$



- при температуре $540\text{ }^\circ\text{C} < t < 1400\text{ }^\circ\text{C}$

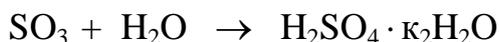


Образование сернистого ангидрида SO_2 идет в КС в условиях высоких температур продуктов сгорания (k_1 – коэффициент конверсии SO_2 в SO_3). Окисления SO_2 в SO_3 , т.е. приводящая к образованию серного ангидрида SO_3 , начинается в КС, но наиболее интенсивно идет при понижении температуры в потоке ОГ в выпускном трубопроводе. Чем выше концентрация O_2 , тем больше значение коэффициента конверсии k_1 при одинаковой температуре ОГ; чем выше значение температуры, тем меньшее количество SO_2 окисляется до SO_3 .

Скорость протекания указанной реакция невысокая, т.к. эта реакция три-молекулярная, т.е. идущая через взаимодействие SO_2 не только с O_2 , но любой третьей молекулой (Мл). Но для потока ОГ значительную роль дополнительно играет фактор времени: при высоких скоростях потока ОГ в системе выпуска ДВС температура ОГ быстро падает, что приводит к “закалке”, т.е. текущая концентрация продуктов реакции не успевает следить за изменением температуры. Поэтому можно принять, что реакция конверсии прекращается при мак-

симальных температурах ОГ при их выходе из цилиндра двигателя. Для условий горения в дизеле содержание O_2 в ОГ находится в пределах 5,0...18,0 %.

- при температуре $140^\circ C < t < 540^\circ C$



Реакция взаимодействия серного ангидрида с парами воды (последние – результат сгорания водорода топлива) - приводит к образованию серной кислоты H_2SO_4 . Однако серная кислота очень гигроскопична – одна весовая часть кислоты может присоединить к себе до 10 весовых частей воды. Соответственно, в указанной реакции коэффициент k_2 – это коэффициент гидратации, который может изменяться в пределах 5,0...10,0.

В состав смазочных масел входят различные присадки: моющие, диспергирующие, антикоррозионные, противопенные... Указанные присадки изготавливаются на основе различных веществ, в т.ч. моющие присадки – на основе таких щелочноземельных металлов как барий Ва и кальций Са. Поскольку часть смазочного масла попадает в КС, то и в ОГ присутствуют соединения Ва и Са. Взаимодействие серной кислоты с этими двумя металлами приводит к образованию средних солей серной кислоты MSO_4 , которые являются твердыми и называются твердыми сульфатами. При взаимодействии H_2SO_4 с любыми другими веществами образуются слабые соли серной кислоты, которые являются жидкими.

Образование твердых сульфатов MSO_4 происходит по схеме:

- при температуре менее $140^\circ C$



где Me – металл (барий Ва или кальций Са), MSO_4 – соль серной кислоты (твердые сульфаты), k_3 – коэффициент полноты реакции.

Таким образом, количество образующихся твердых сульфатов при горении топлива в ДВС зависит от содержания серы S в топливе, степени k_1 конверсии SO_2 в SO_3 , степени k_2 гидратации H_2SO_4 и степени k_3 полноты реакции H_2SO_4 с Ва и/или Са, содержащимися в моющих присадках к маслам. Соответ-

ственно, изменение концентрации продуктов сгорания серы, в т.ч. и MSO_4 , в ОГ пропорционально часовому расходу топлива G_T

ЛЕКЦИЯ №4. ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ НЕПОЛНОГО СГОРАНИЯ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Углеводороды
2. Оксид углерода
3. Углерод (сажа)
4. Дисперсные частицы

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Углеводороды

В камере сгорания ДВС происходит процесс окисления (горения) не только топлива, но и смазочного масла.

Воздействию высокой температуры продуктов сгорания топливовоздушной смеси подвергается масло, находящееся на стенках цилиндра выше уровня верхнего поршневого кольца, куда масло проникает в связи с насосным действием поршневых колец. При движении поршня от верхней мертвой точки (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ), нижнее поршневое кольцо под действием сил инерции прижимается к верхней плоскости поршневой канавки. При этом масло со стенок цилиндра сгребается поршневым кольцом в освободившееся пространство канавки. При движении поршня в обратном направлении - от НМТ к ВМТ - кольцо прижимается к нижней части канавки, и масло выжимается в освободившееся пространство в сторону следующего кольца. При очередном движении поршня от ВМТ к НМТ все повторяется, и т.д. Именно таким образом часть масла попадает в КС.

Второй источник попадания масла в КС - зазор между втулками и стержнями впускных и выпускных клапанов головки цилиндра в случае их неудовлетворительного уплотнения.

На расход масла на угар оказывают влияние следующие факторы: испаряемость масла, конструкция цилиндра и поршня, качество обработки и степень износа трущихся поверхностей. Минимальный расход масла на угар наблюда-

ется при наработке двигателя 125...500 часов; при меньшей наработке идет процесс приработки трущихся поверхностей, при большей – износ поверхностей и, соответственно, увеличение зазоров.

Также источниками содержания несгоревших углеводородов C_nH_m топлива и масла в ДВС с внешним смесеобразованием являются:

- отложения топлива на стенках впускного трубопровода и впускного клапана. Это топливо постепенно сносится потоком топливоздушной смеси в камеру сгорания, приводя к переобогащению рабочей смеси в камере сгорания (КС) и нестабильности рабочих циклов;

- вынос части топливоздушной смеси из впускного трубопровода в выпускной при перекрытии впускного и выпускного клапанов.

Источником несгоревших углеводородов в дизеле будет наличие в КС зон как с переобогащенной топливоздушной смесью, так и переобогащенной. Соответственно, полнота сгорания будет определяться недостатком одного из компонентов (топлива или окислителя). Кроме того, источником углеводородов являются процессы подпрыска топлива из форсунки при неконтролируемом отскоке иглы распылителя от седла, а также подтекания топлива из распылителя форсунок за счет наличия остатков топлива в подыгольном пространстве распылителя.

2. Оксид углерода

Оксид углерода CO. Его образование, в отличие от углеводородов топлива и масла, идет в зонах с более высокой температурой, приводя к частичному окислению распавшихся углеводородов. Вторым источником образования CO является процесс диссоциации диоксида углерода CO_2 в зоне высоких (более 2000 К) температур.

В двигателях с *внешним смесеобразованием* образование оксида углерода определяется, главным образом, составом топливоздушной смеси. Для богатых смесей ($\alpha < 1$) концентрация CO в ОГ пропорциональна избытку топлива

относительно окислителя, а для бедных ($\alpha > 1$) - практически постоянна (см. рис.3.2).

Для условий сгорания, характерных для кинетического механизма, при температуре и давлении, близких к максимальным в цикле (2800 К и 6...7 МПа, соответственно), система «углерод - кислород - водород» находится в равновесии. Поэтому концентрация СО в продуктах сгорания близка к равновесной, поскольку характеристическое время установления равновесия для СО меньше, чем характеристическое время изменения параметров сгоревшего газа.

В *дизелях* образование СО связано с характером пространственной неоднородности концентраций топлива и окислителя и температуры в камере сгорания. В фазе формирования диффузионного фронта пламени процесс горения идет в пределах от нижнего до верхнего коэффициентов избытка воздуха. В данном случае образование оксида углерода связано как с характером распределения локального коэффициента избытка воздуха, так с количеством топливозвоздушной смеси, находящейся в указанной зоне. В фазе диффузионного режима горения ширина фронта пламени резко сужается и фактически становится поверхностью раздела топлива и окислителя. Последнее обстоятельство способствует интенсивному распаду топлива, скорость окисления которого будет зависеть от уровня температуры в зоне реакции (

3. Углерод (сажа)

Углерод (сажа) С - продукт термического распада углеводородов на углерод и водород в условиях отсутствия окислителя; этот процесс называется крекинг (cracking - расщепление). Выделяющийся водород впоследствии сгорает полностью, а углерод – частично. Причина образования сажи – крайняя неравномерность распределения топлива по объему КС, приводящее к местным переобогащениям смеси вплоть до наличия жидких капель. При прохождении фронта пламени через указанные переобогащения (или, наоборот, при забросе капель топлива во фронт пламени) и в случае недостатка времени на испарение топлива с последующим перемешиванием с окислителем, происходит процесс дегидрогенизации углеводородных молекул.

Наличие углерода С (в виде сажи) в ОГ характерно для дизелей при их работе при максимальных нагрузках (хотя и в этом случае $\alpha > 1,0$). Подобная ситуация отражает особенности горения предварительно неперемешанных топлива и окислителя (т.н. диффузионное горение) в отличие от горения предварительно подготовленной топливовоздушной смеси в ДВС с внешним смесеобразованием. Хотя (при условии большого недостатка кислорода) возможно образование сажи и при горении газообразных топлив, в том числе метана – самого легкого из углеводородов.

Любое топливо (даже газообразное) при реализации диффузионного типа горения образует сажу, что характеризуется предельной высотой ламинарного пламени. При диффузионном горении зона образования сажи непосредственно примыкает к фронту пламени. Это определяется недостатком окислителя и высоким значением температуры пламени, при которых и идет процесс крекинга. Поверхность углеродистых частиц изрезана огромным количеством микротрещин и пор различных формы и размеров, т.е. отличается высокой степенью *порозности*. Поры могут быть сквозными, причем внутренняя поверхность пор может быть больше внешней поверхности частицы сажи. Горение сажи (твердого углерода - С₄) - *гетерогенный* процесс: углерод - твердая фаза, окислитель - газ. Скорость этого процесса определяется как кинетикой горения самих частиц (на поверхности и в глубине), так и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания у горящей поверхности частицы. Вследствие порозности углерод горит не только на поверхности, но и внутри.

Внешним проявлением избыточного образования сажи является окрашивание ОГ в черный цвет.

4. Дисперсные частицы

Отработавшие газы представляют собой аэрозоль – газовую среду, в которой взвешены твердые и жидкие частицы; распределение частиц в газовой среде характеризуется параметром “дисперсность”, в связи с чем их называют “дисперсными частицами”. Дисперсность - это количество частиц в единице объема, а также распределение частиц по размеру. Чем мельче частицы, тем выше дисперсность.

Размер частиц является функцией химических и физических процессов, происходящих в период от начала образования частиц до их отбора с целью определения их массы и/или количества по различным фракциям (различному размеру), и зависит от таких процессов как разбавление ОГ воздухом, коагуляция, конденсация, сублимация и т.д. Основной вред, наносимый окружающей среде, обусловлен не массой дисперсных частиц, а их размером и количеством.

К твердым веществам относятся сажа С (углерод), твердые сульфаты MSO_4 и часть суммарных углеводородов с углеродным числом от C_{18} и выше. При этом в сажу переходит около 25% масла, попавшего в КС и сгоревшего (полностью или частично); это количество масла определяет значение такого показателя как “расход масла на угар”. Кроме того, к РМ относятся зола и кокс топлива и масла (ЗКТиМ), а также продукты износа деталей двигателя (ПИ). Однако содержание ЗКТиМ и ПИ незначительно, поэтому отдельно их выделяют только в случае определения химического состава РМ.

Жидкая часть РМ представлена частью суммарных углеводородов с углеродным числом от C_5 до C_{17} , а также парами серной кислоты. Вода в состав дисперсных частиц не входит.

Дисперсные частицы условно делятся на две категории: 1) непосредственно образованные частицы в процессе горения, а также вследствие химических превращений газообразных веществ в твердые; 2) продукты коагуляции (укрупнения) более мелких, а также адсорбции газообразных соединений на них – коагулированные частицы.

Непосредственно образованные разделяют на две группы: 1) зародышевые (ядерные) с аэродинамическим диаметром до 50 нм; 2) ультра-

мелкие, размером 50...100 нм. Продукты коагуляции также делят на две группы: 1) мелкие, 100...2500 нм (или 0,1...2,5 мкм); к этой группе относят и твердые сульфаты; 2) крупные, размером от 2,5 до 10 мкм. При этом крупные РМ могут в силу ряда обстоятельств образовываться как отдельные частицы, а не в результате коагуляции. Коагулированные частицы часто распадаются на более мелкие составляющие.

ЛЕКЦИЯ №5. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Система газообмена
2. Система наддува
3. Система топливоподачи
4. Камера сгорания
5. Рециркуляция отработавших газов

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Система газообмена

От геометрии и количества впускных и выпускных клапанов и каналов зависит аэродинамика движения воздушного заряда: величина закрутки и сопротивление его движению. Применение впускных каналов различного типа — тангенциальных и винтовых — также позволяет организовать необходимый характер движения воздушного заряда.

Профилирование каналов и клапанов позволяет повысить коэффициент наполнения цилиндра, улучшить очистку камеры сгорания от остаточных газов. Все это должно обеспечивать увеличение полноты сгорания топлива, т. е. приводить к снижению выброса продуктов неполного сгорания и увеличению эмиссии оксидов азота. Современная тенденция — переход от двухклапанных головок цилиндров к трех- и четырехклапанным.

2. Система наддува

Наддув двигателей обеспечивает возможность увеличения максимальных значений цикловой подачи топлива, что позволяет повысить мощность двигателя и среднее эффективное давление. У дизелей с наддувом на режимах внешней скоростной характеристики коэффициент избытка воздуха достигает значений $\alpha = 1,7...2,2$, в то время как у безнаддувных дизелей с непосредственным

впрыском $\alpha = 1,3 \dots 1,5$, а у предкамерных — $\alpha = 1,15 \dots 1,35$. Применение наддува оказывает неоднозначное влияние на выброс оксидов азота с отработавшими газами, так как, с одной стороны, увеличивается значение α , снижая эмиссию, но с другой, эмиссия увеличивается вследствие роста температуры воздуха на впуске.

С целью предотвращения повышенных выбросов оксидов азота применяют ТКР с перепуском воздуха - при повышении давления наддува выше заданного часть воздуха после компрессора перепускается за турбину. Подобный турбокомпрессор обеспечивает высокие значения коэффициента избытка воздуха на режиме максимального крутящего момента (на котором обычно бывает повышенное образование NO_x). И в то же время предотвращает излишнее увеличение давления наддува на более высоких скоростных режимах при работе двигателя по внешней скоростной характеристике.

3. Система топливоподачи

Регулировочные характеристики системы топливоподачи обуславливают характер развития топливной струи в камере сгорания, интенсивность распыливания топлива, дисперсность топливных капель, скорость процесса смешения и т. п.

Величина цикловой подачи топлива определяет величину задержки воспламенения, количество топлива, находящееся выше и ниже пределов воспламенения, и т. д. Т.е. однозначно оценить характер влияния этого параметра на изменение состава ОГ невозможно, все будет зависеть от сочетания значений других параметров. В основном, эмиссия NO_x , а также дымность отработавших газов увеличиваются с ростом цикловой подачи; выбросы CO и CH имеют минимум в зоне средних нагрузок. В случае высоких форсировок дизеля по нагрузке возможно снижение эмиссии NO_x при нагрузках, больших 90% от полной.

Важным фактором, влияющим на характер развития процессов смесеобразования и сгорания, является значение максимального давления впрыскива-

ния топлива $P_{\text{тmax}}$. Применение повышенных (до 100,0 МПа), высоких (до 150,0 МПа) и сверхвысоких (150,0...250,0 МПа) давлений впрыскивания топлива заставило вернуться к использованию аккумуляторных систем топливоподачи, в которых участок высокого давления топлива отделен от участка управления моментом и количеством подаваемого топлива. Одной из таких систем является система Common Rail (т. е. “общая магистраль”). Для реализации необходимых функций в аккумуляторных системах предварительно необходимо получить соответствующие данные для составления т. н. “карты режимов”. Аналогичные карты должны быть подготовлены и для других параметров процесса топливоподачи: угла опережения впрыскивания, дробности впрыска. При этом оптимизация характеристик двигателя может быть выполнена по любому выходному параметру: экономичности, выбросам вредных веществ или другим.

Повышение давления $P_{\text{тmax}}$ в обычных системах обуславливает значительное возрастание нагрузок на детали системы топливоподачи: топливопроводы, форсунки, распылители, кулачковые валы ТНВД и т. д. В результате — ускоренный износ пар трения, разрушение деталей, увеличение механических потерь на привод ТНВД и неравномерности вращения коленчатого вала.

Фактор повышения максимального давления впрыскивания топлива оказывает положительное влияние в первую очередь на мелкость распыливания топлива, приводя к лучшему смесеобразованию, более быстрому прогреву и испарению капель и, соответственно, к более полному сгоранию.

Степень распыливания характеризуется средним Заутеровским диаметром SMD, который представляет собой размер капли, имеющей то же отношение поверхности к объему, что и вся струя топлива:

$$\text{SMD} = \Sigma d_k^3 / \Sigma d_k^2$$

Все параметры системы топливоподачи взаимосвязаны. Одним из интегральных показателей является гидравлическая характеристика распылителя — зависимость расхода топлива Q (или эффективного проходного сечения μF) от величины подъема иглы распылителя. Интенсивное увеличение эффективного проходного сечения позволяет сократить время впрыскивания топлива в КС,

т. е. существует возможность уменьшить угол опережения впрыска топлива, что приведет к снижению выбросов оксидов азота с отработавшими газами.

4. Камера сгорания

Геометрия камеры сгорания определяет характеристики движения воздушного заряда в цилиндре, объем первоначального развития топливных струй и тип смесеобразования. Среди дизелей с непосредственным впрыском топлива в КС следует выделить двигатели с открытой камерой (типа Гессельман), характеризующиеся объемным смесеобразованием (все топливо подается и сгорает в объеме КС); полуоткрытой камерой (полусферической, омегаобразной, типа ЦНИДИ), характеризующиеся объемно-пленочным смесеобразованием (небольшая часть топлива подается на стенки КС и сгорает при испарении со стенок камеры, а основная — в объеме КС). К последним можно отнести и двигатели с М-процессом, но отличающимися тем, что основная часть топлива (до 95%) подается на стенки камеры сгорания и сгорает при испарении со стенок, но только незначительная часть (около 5%) сгорает в объеме, куда впрыскивается форсункой для обеспечения воспламенения топлива.

Каждый из типов смесеобразования имеет как преимущества, так и недостатки. Относительно образования вредных веществ при объемном смесеобразовании в отработавших газах наблюдается наименьшее количество продуктов неполного сгорания; при пленочном - наименьшие выбросы оксидов азота; объемно-пленочный тип занимает промежуточное положение.

Увеличение степени сжатия приводит к росту температур продуктов сгорания, т. е. к росту эмиссии NO_x и снижению эмиссии C_nH_m . Последнее обуславливается уменьшением отношения площади поверхности камеры сгорания к ее объему. С другой стороны, повышение температуры сжатия обусловит уменьшение периода задержки воспламенения и, вследствие этого, уменьшение количества топливо-воздушной смеси, подготовленной за этот период.

В результате количество оксида азота, образовавшегося при кинетическом горении меньшего количества топлива, также снизится. Поэтому трудно

однозначно оценить результирующие последствия. В одних случаях эмиссия NO_x снизится, в других — увеличится. В этом случае, как и во многих других, все определится совокупным влиянием других факторов.

5. Рециркуляция отработавших газов

Одним из путей улучшения экологических характеристик дизелей за счет воздействия на рабочий процесс является применение рециркуляции отработавших газов (РОГ или EGR — Exhaust Gas Recirculation) — перепуск части отработавших газов во впускной коллектор. Основная цель применения данного метода — сокращение эмиссии оксидов азота NO_x .

Необходимый эффект достигается благодаря: 1) повышению теплоемкости смеси ОГ и воздушного заряда, что приводит к снижению максимальных температур, а также 2) уменьшению концентрации кислорода в смеси, что обуславливает снижение скорости окисления азота. Теплоемкость смеси увеличивается из-за наличия в ОГ газов с повышенной теплоемкостью: диоксидов азота и углерода.

Изменение концентрации кислорода в смеси и теплоемкости смеси возможно различными методами: организацией внутренней рециркуляции (увеличение перекрытия впускных и выпускных клапанов), увеличения коэффициента остаточных газов (снижение степени сжатия), традиционной рециркуляцией, обогащением воздушного заряда азотом.

Для дизелей с турбонаддувом возможно применение двух различных схем системы рециркуляции: 1) с отбором ОГ после турбины и подводом рециркулируемых газов во впускной коллектор перед компрессором; 2) с отбором ОГ перед турбиной и подводом во впускной коллектор после компрессора. В последнем случае подвод РГ возможен либо перед охладителем наддувочного воздуха, либо после него. При этом отводимые из выпускного коллектора ОГ могут пропускаться через противосажевый фильтр.

ЛЕКЦИЯ №6. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВС С ВНЕШНИМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Состав смеси
2. Система подачи топлива (карбюратор, центральный впрыск, распределенный впрыск, непосредственный впрыск)
3. Расслоение топливо-воздушной смеси
4. Дросселирование смеси
5. Тактность
6. Турбонаддув

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Состав смеси

Состав смеси (который характеризуется коэффициентом избытка воздуха α) в двигателях с принудительным воспламенением в отличие от дизелей меняется в гораздо более узких пределах: от $\alpha = 0,85$ до $\alpha = 1,15$, что соответствует, приблизительно, соотношению массовых расходов воздуха и топлива $A/F = 12,8 \dots 17,4$ (при $\alpha = 1$ $A/F \approx 15,3$). Концентрация диоксида углерода CO и суммарных углеводородов C_nH_m минимальна при работе на обедненных смесях ($\alpha = 1,05 \dots 1,1$), но при этом максимальна концентрация NO_x в отработавших газах. Обеднение смеси свыше $\alpha=1,1$ может привести к росту эмиссии C_nH_m . Обуславливается это снижением скорости сгорания бедных смесей, увеличением степени цикловой неравномерности и даже возможностью пропусков воспламенения в отдельных цилиндрах. Эмиссия CO для бедных смесей практически постоянна, а в богатых смесях увеличивается по мере уменьшения α в связи с увеличением избыточного топлива. Однако разработка процессов горения бедных смесей позволяет обеспечить стабильность процесса горения до $\alpha = 1,5$,

препятствуя увеличению эмиссии углеводородов; при этом выбросы NO_x поддерживаются на низком уровне.

Обеднённые смеси горят медленнее, что приводит к уменьшению содержания в ОГ оксида углерода. Максимальная мощность и максимальный крутящий момент двигателя достигаются при работе на обогащённой смеси с коэффициентом $\alpha = 0,9$. Однако это сопровождается некоторым увеличением расхода топлива и концентрации в отработавших газах углеводородов, сажи и оксида углерода. Слишком бедные и слишком богатые смеси либо вообще не воспламеняются, либо горят плохо, работа двигателя отличается неравномерностью, мощность падает, увеличивается расход топлива. Указанные признаки являются общими признаками работы двигателя, имеющего нарушения нормального смесеобразования. При работе на богатой смеси может иметь место: 1) дымный выпуск чёрного цвета из глушителя; 2) «выстрелы» в глушителе; 3) повышенное отложение нагара на деталях ЦПГ, свечах зажигания и клапанах; 4) увеличение содержания оксидов углерода в отработавших газах.

2. Система подачи топлива

Применение систем подачи горючей смеси в цилиндры двигателя с помощью карбюраторов уходит в прошлое, поскольку недостатком таких систем является невозможность обеспечить точную дозировку топлива по цилиндрам. Кроме того, слишком много топлива в виде тонкой пленки остается на стенках впускного коллектора. В дальнейшем эта пленка постепенно сносится потоком воздуха в сторону впускного клапана и периодически в цилиндр начинает поступать избыточное количество топлива. В результате, в ОГ резко повышается содержание продуктов неполного сгорания: углеводородов и оксида углерода.

Поэтому выполнение жестких нормативных требований к содержанию ВВ в отработавших газах с помощью карбюраторных систем невозможно. Следующим шагом развития систем подачи топливовоздушной смеси стало применение способа впрыскивания топлива во впускной коллектор. При этом применяется либо одноточечный - центральный впрыск или многоточечный - распре-

деленный впрыск. В первом случае топливо впрыскивается одной форсункой, а во втором- несколькими, устанавливаемыми перед впускными клапанами. В дальнейшем были разработаны системы непосредственного впрыскивания бензина в камеру сгорания. Эти системы позволили избежать недостатков, присущих системам на основе карбюратора. Кроме того, новые системы были гораздо лучше приспособлены для электронного регулирования подачи топлива, обеспечивая снижение эмиссии продуктов неполного сгорания и улучшение топливной экономичности двигателей.

Один из методов повышения эффективности процесса смесеобразования в системах с непосредственным впрыском топлива – распыливание топлива, подаваемого через распыливающую форсунку, воздухом. В системе распыливания бензина применены две форсунки: дозирующая и впрыскивающая. Разделение процессов дозирования и впрыскивания позволяет обеспечить более четкое функционирование обеих форсунок. Дозирующая форсунка предварительно подает топливо под давлением порядка 0,7 МПа в аккумулирующую емкость. К впрыскивающей форсунке подводится воздух, и топливовоздушная смесь под давлением около 0,6 МПа подается в КС (второй импульс). Задержка второго импульса относительно окончания первого – 1,5...10,0 мс; продолжительность впрыска в камеру сгорания – 3...6 мс. Общее отношение “воздух-топливо” составляет около 21:1, а для распыливания топлива используется только 2...3%. Применение указанной системы позволяет заметно уменьшить аэродинамический диаметр дисперсных частиц.

3. Расслоение топливо-воздушной смеси

Аналогично применению в дизелях предкамерного смесеобразования, в ДВС с принудительным воспламенением применяют форкамерно-факельное смесеобразование. Суть этого процесса в том, что в дополнительной камере (форкамере объемом 3...4% от объема основной КС) установлены дополнительный впускной клапан и свеча зажигания. В форкамере организуется воспламенение обогащенной смеси, которая выбрасывается в основную КС и там

поджигает сильно обедненную (до $\alpha=1,5\dots 1,6$) смесь. Воспламенение бедной смеси достаточно надежно, так как энергия открытого пламени в $100\dots 10000$ раз выше энергии электрической искры от свечи. В результате эмиссия NO_x снижается почти на 75%, CO - на 50%, а CH - в несколько раз.

Применение форкамерно-факельного смесеобразования является фактически одним из способов искусственного расслоения смеси. Конструктивных решений, обеспечивающих расслоение смеси (послойное смесеобразование), достаточно много. Это может быть дополнительный канал, подводящий богатую смесь непосредственно в зону свечи, или применение предкамеры гораздо большего объема, чем форкамера (до 50% от объема основной КС) и т.д. Но смысл способа один: надежное воспламенение обедненных смесей за счет горячей обогащенной смеси (обеспечить воспламенение богатой смеси гораздо проще). Эта идея аналогична идее интенсификации зажигания, но не за счет увеличения энергии искры, а за счет энергии открытого пламени. Применение метода расслоения смеси позволяет надежно работать при α до $2\dots 2,5$, однако при α свыше 1,25 начинается рост эмиссии CO . Поэтому конкретные регулировки каждого двигателя зависят от его конструктивно-регулирующих особенностей. Существенным достоинством способа расслоения смеси является низкая чувствительность к детонации, что позволяет увеличивать степень сжатия до 13 единиц, обеспечивая тем самым дополнительное улучшение топливной экономичности в связи с ростом термодинамического КПД.

4. Дросселирование смеси

Способ дросселирования смеси за счет изменения подъема впускного клапана позволяет увеличить турбулентность потока смеси в цилиндре, что особенно заметно на частичных нагрузках (в отличие от дросселирования дроссельной заслонкой, приводящей к снижению турбулентности потока в цилиндре на частичных нагрузках). Применение специальной ширмы на впускном клапане для турбулизации потока мало оправдано в связи с усложнением кон-

струкции клапана, увеличением его массы, но главное - в связи со снижением коэффициента наполнения на номинальном режиме.

5. Тактность

Двухтактные двигатели в связи с худшими условиями очистки цилиндров от продуктов сгорания предыдущего цикла, а также ранним открытием выпускных окон отличаются, в основном, значительно большими выбросами углеводородов. Этому способствует также и добавка масла в бензин, предназначенный для этих типов ДВС, с целью обеспечения необходимых условий трения сопряжения “цилиндр – поршень”.

Однако в последнее время снова возник интерес к двухтактным двигателям. Многие их недостатки могут быть устранены на базе современных достижений, в том числе – за счет впрыскивания бензина непосредственно в цилиндр. И в этих условиях следует обратить внимание на такое явное преимущество двухтактных двигателей, как их более высокая равномерность хода. Для условий применения на легковых автомобилях и легких грузовиках одно-, двух-, трех- и четырехцилиндровых двухтактных двигателей указанное преимущество может оказаться решающим. К этому стоит добавить меньший вес при одинаковой с четырехтактными двигателями мощности. Все это в сумме позволит существенно снизить эксплуатационный расход топлива, выбросы вредных веществ, а также – выброс диоксида углерода.

6. Турбонаддув

В конструкциях современных ДВС с искровым зажиганием для снижения выбросов вредных веществ применяется турбонаддув. Ранее подобное решение вызывало большие технические затруднения в связи с возникновением детонации, поскольку в камеру сгорания двигателя подавалась топливо-воздушная смесь с повышенной температурой за счет сжатия в компрессоре. Применение же высокооктановых бензинов наряду с системой охлаждения топливо-воздушной смеси после компрессора позволило за счет подачи обедненной

топливо-воздушной смеси и применения искрового зажигания с повышенной энергией искры снизить выбросы продуктов неполного сгорания (оксида углерода и суммарных углеводородов) и оксидов азота одновременно.

ЛЕКЦИЯ №7. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Классификация топлив
2. Твердые топлива
3. Жидкие топлива
4. Газообразные топлива

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Классификация топлив

Топливо – это источник энергии. Виды топлив многообразны, но как источник энергии их можно разделить на два класса – невозобновляемые или ископаемые (нефть, газ, уголь) и возобновляемые (торф, различные виды растительности, отходы жизнедеятельности животных, промышленные и бытовые отходы). Первые образовались в предшествующие геологические периоды развития Земли и их количество, соответственно, ограничено, а вторые воспроизводятся постоянно, соответственно, их ресурсы непрерывно восстанавливаются.

В настоящее время все топлива также делят на традиционные и альтернативные. Для энергоустановок на базе поршневых, газотурбинных и реактивных двигателей традиционными являются бензин, дизельное топливо и керосин, для отопительных печей и котлов – уголь, сланцы, торф, дрова, мазут. В том случае, если для конкретной энергоустановки используется иное топливо (не традиционное), то оно считается альтернативным. При этом если топливо растительного происхождения, или если оно является продуктом естественной или искусственной переработки отходов растительного и животного происхождения (т.е. получаемое из биомассы – материала биологического происхождения, за исключением материала в геологических породах, ставшего ископаемым), то такое топливо относится к классу биологических, т.е. биотоплив. Кроме того,

вещества, применяемые в качестве топлива, классифицируются и по агрегатному состоянию: твердому, жидкому и газообразному.

Человечество использует все виды топлив для получения энергии, при этом основными источниками остаются пока нефть и уголь: вместе они обеспечивают 50% необходимой энергии.

2. Твердые топлива

Основные виды твердых топлив - древесина и ее суррогаты, древесный и каменный угли, антрацит, сланцы и торф. Для них различают следующие составляющие:

- рабочая масса (все вещества, входящие в состав);
- сухая масса (отличается от рабочей массы отсутствием влаги);
- горючая масса (отличается от сухой отсутствием золы);
- органическая масса (отличается от горючей отсутствием серы); непосредственно органический состав включает в себя четыре элемента – углерод, водород, кислород и азот.

При нагревании из твердых топлив выделяются летучие вещества: водород, оксиды углерода (углекислый и угарный газы), метан и более тяжелые углеводороды. Выход летучих веществ зависит от содержания в топливе кислорода и водорода – чем их больше, тем больше летучих. Для дров – до 85% от горючей массы, торфа – до 70%, бурых углей – до 40...60%, каменных углей – до 10...40%, сланцев – до 80%. В случае нагревания без доступа воздуха после выхода всех летучих веществ от топлива остается кокс – вещество с содержанием углерода 95...98%.

Твердые топлива при сгорании оставляют золу – несгораемый остаток: песок и частицы грунта, а также минеральные вещества (среди жидких топлив этим отличаются наиболее тяжелые). Содержание минералов – от долей процентов до десятков процентов. Под воздействием высокой температуры минералы расплавляются и перемешиваются с другими частицами, в результате после остывания образуется шлак (камни).

Твердые топлива применяют в стационарных энергетических установках - котлах и отопительных печах; в ДВС такой вид топлив практически не применяют, исключение составляет порошкообразный уголь в смеси с жидким топливом (эти работы носят экспериментальный характер).

2. Жидкие топлива

К жидким топливам относятся нефть и продукты ее переработки, спирты, масла (получаемые путем переработки различных растений: подсолнечника, рапса, сои, арахиса, апельсина, эвкалипта, хлопка и т. д.) и эфиры этих масел. Несмотря на разнообразие жидких топлив, основным видом остается нефть. Нефть - это природное полезное ископаемое, представляющее сложную смесь жидких углеводородов различного молекулярного веса. Нефть служит сырьем для производства автомобильного бензина и минеральных смазочных масел, авиационного керосина, дизельного топлива и топочного мазута; она также используется в химической промышленности для производства разнообразной продукции.

В России, согласно ГОСТ Р 51105–97, с 1 января 1999 г. выпускается четыре сорта неэтилированных (не содержащих повышенные концентрации присадок свинца для увеличения октанового числа) бензинов: Нормаль–80, Регуляр–91, Премиум–95 и Супер–98 (цифры в названии — октановое число – ОЧ - по исследовательскому методу, т. е. соответствуют обозначению для бензинов типа АИ). Содержание свинца в них не более 0,01 г/л. Этилированным и неэтилированным выпускается только бензин Нормаль–80 (он же А-76 если октановое число определено по моторному, а не по исследовательскому методу). Для повышения ОЧ без применения высокотоксичных соединений свинца (этилированной жидкости) применяют присадки на основе метилтретбутилового эфира (МТБЭ) $C_{14}H_{30}O$.

В отношении ДТ большое внимание уделяется снижению содержания серы. Во многих городах Европы разрешается использовать только т. н. "городское топливо" — дизельное топливо с содержанием серы не более 0,05%, т. е. 500 ppm (в обычном ДТ серы может быть в десять раз больше — до 0,5%).

Планировалось к 2005 г. обеспечить содержание серы в дизельном топливе не более 0,035% (350 ppm), в бензине — не более 0,015% (150 ppm), а к 2009 г. достичь уровня 0,005% (50 ppm). Но проблема применения малосернистого топлива имеет еще одну сторону - сера улучшает смазочные свойства топлива. Благодаря этому сернистое топливо обеспечивает смазку прецизионных пар в топливных насосах высокого давления. Снижение содержания серы в дизельном топливе требует добавки в топливо противоизносных присадок.

Для увеличения выхода топлив из нефти применяют топлива, созданные путем введения в дизельное топливо других фракций, как более легких (получая топлива широкого фракционного состава – ШФС), так и более тяжелых (топлива утяжеленного фракционного состава – УФС), а также обоих видов фракций (топлива расширенного фракционного состава – РФС). Кроме того, в тихоходных дизелях применяют более тяжелые топлива, такие как товарная нефть и мазуты.

Находят применение и спирты, которые применяют как добавки к бензинам. Обычно используются этанол (этиловый спирт) C_2H_5OH и метанол (метиловый спирт) CH_3OH . Использование спиртов объясняется, в первую очередь, их высокой детонационной стойкостью: ОЧ по моторному методу у метанола 104...115, у этанола - 106 единиц. Но для того, чтобы это влияние было заметно в случае применения в смеси с бензином, октановое число которого не более 98, добавка должна быть не менее 25...50%.

Среди жидких топлив есть и биотоплива: различные масла (например, апельсиновое, арахисовое, подсолнечное, рапсовое, соевое, хлопковое, эвкалиптовое и т. п.), а также их эфиры. Масла получают посредством отжима из первичного продукта, а эфиры - путем этерификации (взаимодействия со спиртами) масел в присутствии катализатора. Часто используемый термин “биодизель” означает, что это биотопливо пригодно к применению в дизелях, причем либо в чистом виде, либо в смеси с ДТ. Термин “биоэтанол” указывает на то, что этанол получен из злаковых растений; биоэтанол применяется как добавка к бензину.

3. Газообразные топлива

К этому виду топлив относятся:

- природный и нефтяной газы,
- промышленные газы (получаемые в результате функционирования заводов по переработке нефти: газы прямой перегонки, термического и каталитического крекингов, коксования мазута и гудрона, пиролиза бензина, каталитического риформинга),
- канализационные газы (получаемые при обработке сточных и канализационных вод),
- биогазы (получаемые при переработке продуктов растительного и животного происхождения),
- генераторные газы (получаемые при термогазогенерации древесных отходов, угля и торфа),
- водород, аммиак и некоторые другие.

Наиболее широкое применение из газообразных топлив нашли природный и нефтяной газы. Сухой природный газ (добываемый из неглубоких горизонтов — до 1300 м) состоит на 90 — 99% из метана. Газовый конденсат (добываемый из более глубоких горизонтов) содержит 80 — 90% метана.

Одним из продуктов переработки биомассы являются биогазы — продукт анаэробного (без доступа воздуха) брожения. Переработка биомассы в топливо идет по двум направлениям: 1) биологическая конверсия за счет сбраживающего воздействия микроорганизмов и 2) термохимическая конверсия за счет воздействия высокой температуры. Состав биогазов: 50... 80% метана, 20...50% диоксида углерода, остаток — сернистые соединения и азот. Брожение 1 т органического вещества (по сухому весу) дает до 350...600 м³ биогаза.

Генераторные газы получают путем термохимической конверсии твердых топлив за счет воздействия повышенной температуры и при недостатке окислителя. В качестве исходного сырья могут использоваться древесные отходы, уголь, торф, солома. Основные составляющие получаемого газа – это горючие

вещества: оксид углерода, водород и метан, которые могут служить топливом для двигателей внутреннего сгорания.

Применение водорода H_2 в качестве топлива перспективно в связи с практически безграничными ресурсами, поскольку его источником может быть вода. Кроме того, водород может быть получен в результате термической конверсии углеводородных топлив, как жидких, так твердых и газообразных.

ЛЕКЦИЯ №8. НЕЙТРАЛИЗАТОРЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Классификация нейтрализаторов (каталитические, термические, жидкостные)
2. Характеристики нейтрализаторов (активность, селективность, стартовые качества, ресурс)

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Классификация нейтрализаторов (каталитические, термические, жидкостные)

Нейтрализаторы — устройства, в которых реализуется способность вредных компонентов отработавших газов окисляться или восстанавливаться до безвредных диоксида углерода CO_2 , воды H_2O и азота N_2 . Корпус нейтрализатора обычно изготавливается из нержавеющей стали. Внутри корпуса находится носитель (матрица) активного элемента, изготавливаемый, чаще всего, из металла или керамики. Носители бывают сотового (ячеистого) вида, в виде сферических или цилиндрических гранул, а также изготовленные из жаропрочной металлической ленты или термоустойчивого тканого материала. Первые представляют собой монолит со сквозными (круглыми или многогранными) отверстиями.

На практике применяются нейтрализаторы трех типов: каталитические, термические и жидкостные.

Каталитические нейтрализаторы в отличие от других типов нейтрализаторов характеризуются наличием катализатора — активного элемента, ускоряющего протекание реакции нейтрализации вредных веществ до безвредных. Активный элемент, или катализатор, может быть как твердым, так и жидким веществом: твердый наносится на носитель, либо входит в состав носителя, а жидкий впрыскивается в поток ОГ, проходящих через нейтрализатор.

Этот тип нейтрализатора выполнен таким образом, что поток ОГ разбивается на множество отдельных струй, обеспечивая тем самым увеличение площади контакта отработавших газов с поверхностью активного элемента, нанесенного на поверхность носителя. В результате увеличивается время контакта ОГ с катализатором. На рис. 5.6 представлен каталитический нейтрализатор с монолитным носителем ячеистого типа. Толщина стенок отверстий — порядка 0,15...0,20 мм; количество ячеек — несколько десятков на квадратный сантиметр. Стенки отверстий проницаемы для газов. Отверстия могут быть поочередно закрыты заглушками с разных сторон, что препятствует сквозному прохождению ОГ вдоль отверстий.

Каталитические нейтрализаторы бывает двух видов: окислительные и восстановительные. Окислительные нейтрализаторы являются двухкомпонентными, т. е. их основная функция — окислить продукты неполного сгорания — оксид углерода и углеводороды до безвредных CO_2 и H_2O . Они позволяют снизить содержание в ОГ двигателей CO и C_nH_m на 30... 95%. Соответственно они окисляют до 50...80% углеводородных остатков топлива и масла, приводя также к снижению эмиссии дисперсных частиц с ОГ.

Нейтрализаторы восстановительного типа применяют для снижения содержания в отработавших газах оксидов азота за счет восстановления NO_x до безвредного азота N_2 . В том случае, если оба указанных вида нейтрализаторов (окислительный и восстановительный) применяются совместно, то такой блок называется бифункциональным (т. е. реализует функции восстановления и окисления) или трехкомпонентным (т. е. воздействует на CO , CH и NO_x).

В качестве катализатора в этих нейтрализаторах применяют благородные металлы, переходные металлы и их оксиды, либо т. н. промотированные катализаторы — соединения оксидов металлов с небольшим (до 0,1%) количеством благородных металлов. Из числа благородных металлов в качестве катализаторов используют в основном платину Pt и палладий Pd (в окислительных нейтрализаторах, а также родий Rh (в восстановительных). Иногда применяют также рутений Ru , рубидий Rb , иридий Ir .

Катализаторы на базе переходных металлов — это металлы с III по VIII группы (кроме благородных) согласно периодической системы элементов. Они применяются или индивидуально, или в смеси с другими элементами в составе *минералов*, например базальта. Этот природный материал достаточно дешевый, имеет тонковолокнистую структуру, высокие температуры плавления (1100...1500 °С) и теплоемкость. В составе базальтов преобладает плагиоклаз (лабрадор).

К числу жидких катализаторов можно отнести водный раствор *мочевины* $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (мочевины в растворе — 32,5%), применяемую для восстановления оксидов азота. Реакция идет в присутствии катализатора; активность метода при этом может достигать 90%. Сначала из водного раствора мочевины под воздействием высокой температуры ОГ образуется диоксид углерода CO_2 и аммиак NH_3 (5.1). Затем аммиак, взаимодействуя оксидами азота, восстанавливает их до азота

Термические нейтрализаторы отработавших газов. Принцип действия термических нейтрализаторов основан на ускорении реакции окисления продуктов неполного сгорания за счет повышения температуры отработавших газов в объеме реактора (до 650...850 °С). В результате нейтрализуются оксид углерода, альдегиды, частицы сажи, а также пары несгоревшего полностью топлива и масла. Эффективность нейтрализаторов достигает 90%. Недостаток — невозможность снижения эмиссии NO_x .

Повышение температуры в реакционном объеме обеспечивается за счет подачи дополнительного топлива, сгорающего в объеме реактора (т. н. пламенные нейтрализаторы), либо за счет электроподогрева. При этом подбирают материалы, способные выдерживать высокие температуры и обеспечивать теплоизоляцию. Возможно обеспечение повышения температуры ОГ за счет увеличения концентрации O_2 в ОГ посредством подачи вторичного воздуха (т. н. беспламенные нейтрализаторы). Но последняя система эффективна, в основном, при работе только на обогащенных смесях, поскольку в других случаях приводит к понижению температуры ОГ за счет переобеднения. С целью недопуще-

ния указанного уменьшения температуры ОГ возможно применение дополнительной теплоизоляции, а также применение средств интенсификации циркуляции ОГ в нейтрализаторе.

Жидкостные нейтрализаторы отработавших газов. В нейтрализаторах этого типа отработавшие газы пропускают через слой жидкости, обычно воды. В результате эффективно поглощается сажа, бенз(α)пирен, окислы серы, формальдегид. С увеличением температуры жидкости поглощение газов ухудшается, но зато улучшается поглощение паров жидких и твердых веществ за счет растворения.

2. Характеристики нейтрализаторов (активность, селективность, стартовые качества, ресурс)

При оценке применимости нейтрализатора для конкретного ДВС используют показатель, равный отношению объемного расхода ОГ к внутреннему объему самого нейтрализатора. Но этот показатель в большей мере характеризует уровень оказываемого нейтрализатором сопротивления потоку ОГ, т. е. уровень возможного негативного влияния на мощностно — экономические показатели ДВС, а не на его экологические характеристики.

Оценка функциональных качеств (или как часто называют — эффективности) нейтрализаторов производится по трем показателям: селективности, активности и стартовым качествам. Селективность — это направленность воздействия на те или иные компоненты. На рис. 5.3 представлены результаты оценки селективности нейтрализатора, полученные при снятии нагрузочной характеристики дизеля. Хорошо видно, что на эмиссию оксидов азота данный нейтрализатор не оказывает никакого влияния, в то время как выбросы оксида углерода и суммарных углеводородов значительно снижаются почти во всем диапазоне нагрузок.

Активность т. е. степень влияния на те или иные компоненты, оценивается отношением разницы концентраций компонента до и после нейтрализатора к концентрации компонента до нейтрализатора. Активность зависит от материала

катализатора, температуры ОГ и времени контакта ВВ с катализатором. Реакция преобразования какого-либо компонента требует определенной температуры. Низкотемпературные катализаторы достаточно активны уже при температуре 100...150 °С. Примером таких материалов может служить смесь марганца и оксида меди — гопкалит. Высокотемпературные каталитические нейтрализаторы достигают максимальной активности при температуре не менее 250...300°С.

Стартовые качества оцениваются по времени достижения 50% активности с момента холодного запуска двигателя.

Кроме оценки нейтрализаторов по функциональным показателям, проводится оценка их *ресурса*. Согласно нормативным требованиям нейтрализаторы должны сохранять свою эффективность в течение 80.000 км (для легковых автомобилей) или 160.000 км (для грузовых автомобилей).

Большим недостатком нейтрализаторов с катализаторами из благородных металлов является их склонность к т. н. “отравлению” — снижению эффективности практически до нуля. Таким негативным влиянием обладают, во-первых, этилированные бензины. Соединения свинца, присутствующие в этих топливах, вступают в химическое взаимодействие с активным элементом на молекулярном уровне, образуя плотную пленку. В результате прекращается контакт между ВВ и катализатором. Во вторых, подобным воздействием обладают и соединения серы, содержащейся как в бензинах, так и в дизельном топливе. “Отравление” нейтрализаторов приводит к сокращению их ресурса. Уменьшает срок эффективного функционирования нейтрализаторов и механическое воздействие потока ОГ на поверхность катализатора, а также термическое разрушение (старение) активного элемента при чрезмерном повышении температуры ОГ (свыше 600 °С). Устранить пленку из соединений свинца возможно только если нагреть ее до температуры более 1000 °С, что недопустимо по причине резкого ускорения термического старения.

Применение каталитических нейтрализаторов на двигателях с принудительным воспламенением, требует установки системы электронного регулиро-

вания состава горючей смеси, что обусловлено обеспечением максимальной эффективности нейтрализации ВВ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1\pm 0,05$. Объясняется это тем, что для окисления продуктов неполного сгорания CO и C_nH_m необходим избыточный кислород (т. е. желательно обеспечить обеднение смеси); для восстановления же NO_x избыточный кислород не нужен. Таким образом, в случае отклонения состава смеси от стехиометрического, активность нейтрализации по одному из видов ВВ снижается: в области коэффициента избытка воздуха менее 1 — по продуктам неполного сгорания, а в области $\alpha>1$ — по оксидам азота.

Известен ряд способов уменьшения дымности и токсичности О. Г. дизелей^[3]. Вопрос о выборе наиболее целесообразного пути решается применительно к конкретным условиям.

1. Совершенствование процессов смесеобразования и сгорания. Преимущество этого способа заключается в том, что одновременно со снижением дымности О. Г. и содержания в них CO и CH улучшаются мощностные и экономические показатели двигателя. Однако интенсификация сгорания приводит к увеличению концентрации NO_x . Наоборот, воздействие на процесс сгорания путем снижения степени сжатия, уменьшения угла опережения впрыскивания топлива или дросселированием воздуха на впуске приводит к уменьшению выхода NO_x , но при этом ухудшаются индикаторные показатели.

Для снижения токсичности О. Г. дизеля необходимо сокращать длительность задержки воспламенения и за этот период впрыскивать основную долю топлива, стремясь к тому, чтобы сгорание происходило в течение второй фазы с небольшой скоростью, а в завершающих фазах — с наибольшей возможной интенсивностью.

2. Рециркуляция отработавших газов.

Если часть отработавших газов из системы выпуска направить во впускной трубопровод, то наполнение цилиндров воздухом уменьшится. При

этом диоксид азота, содержащийся в О. Г. может способствовать сокращению периода задержки воспламенения. Все это вместе с относительно высокой теплоемкостью продуктов сгорания приводит к понижению максимальной температуры цикла и концентрации кислорода в заряде, а значит, способствует уменьшению образования оксидов азота и понижает их концентрацию в О. Г. на 40—50%. Опыты показывают, что для такого снижения концентрации NO_x во впускную систему необходимо подавать отработавшие газы в количестве около 20% от количества воздуха.

Рециркуляция О. Г. более эффективна на режимах малых и средних нагрузок, причем ее эффективность в дизелях с камерой сгорания в поршне выше, чем в дизелях с разделенными камерами. Естественно, что на больших нагрузках рециркуляция О. Г. уменьшает индикаторный к. п. д. и увеличивает выделение CO .

Сходное с рециркуляцией О. Г. воздействие на снижение выхода NO_x : имеет подача воды во впускной трубопровод или в цилиндр дизеля. В последнем случае вода может впрыскиваться вместе с топливом в виде топливно-водяной эмульсии. При добавке воды в количестве 6% (по массе) концентрация NO_x снижается в два раза. Выброс CO и CH при добавке к заряду воды практически не изменяется. Использование воды для подавления образования NO_x : наталкивается на ряд практических трудностей, связанных с возможностью замерзания воды, появления коррозии и увеличением износа некоторых деталей.

3. Топливо и присадки. Увеличение цетанового числа топлива уменьшает период задержки воспламенения, жесткость работы и максимальное давление сгорания, что оказывает сложное влияние на образование токсичных компонентов и дыма. На малых и средних нагрузках увеличение цетанового числа способствует уменьшению выброса NO_x и CH , а на больших в некоторых случаях — повышению дымности выхлопа. Чем больше в топливе легких фракций, тем лучше его испаряемость, а значит, равномернее и состав смеси в камере сгорания, что приводит к

снижению дымности $O. Г.$ и концентрации в них NO_x . Добавка к дизельному топливу в количестве до 1% антидымных присадок, например на основе бария, марганца и тетраэтилсвинца, позволяет при больших нагрузках в несколько раз понизить дымность $O. Г.$ и содержание в них альдегидов и бенз-а-пирена.

4. Нейтрализация $O. Г.$

Радикальный способ уменьшения токсичности $O. Г.$ — нейтрализация (обезвреживание) газов в системе выпуска. В каталитических нейтрализаторах $O. Г.$ дизеля проходят через слой катализатора, сильно ускоряющего протекание окислительных реакций, т. е. превращение CO и CH в CO_2 и H_2O . В результате каталитической нейтрализации при температуре $O. Г.$ более $300^\circ C$ концентрация CO уменьшается на 85—90%, а CH —на 75—80%. При низких температурах $O. Г.$ (менее $300^\circ C$) эффективность каталитических нейтрализаторов невысока. При эксплуатации нейтрализаторы часто забиваются сажей. С этим недостатком борются путем установки перед нейтрализатором специальных улавливателей сажи или путем периодического выжигания ее в самом нейтрализаторе. Каталитические нейтрализаторы применяются на специальных машинах, работающих в условиях повышенной загазованности воздуха.

Термическая нейтрализация заключается в окислении при высоких температурах CO и CH без катализатора. Полнота термической нейтрализации зависит от концентрации токсичного компонента и кислорода, температуры, давления и времени нахождения газов в нейтрализаторе. Если в отработавших газах совсем нет или недостаточно кислорода, то к ним с помощью специального насоса добавляют в соответствующем количестве воздух.

При невысоких температурах (до $150—200^\circ C$ в термическом нейтрализаторе происходит интенсивное окисление NO в NO_2 . Конструктивно термические нейтрализаторы изготовляют в виде теплоизолированных камер, встроенных в выпускную систему по возможности ближе к клапанам. Сис-

тема каналов в нейтрализаторе обеспечивает хорошее перемешивание дополнительного воздуха и О. Г. Термический нейтрализатор увеличивает гидравлическое сопротивление системы выпуска, и поэтому при его установке экономичность двигателя ухудшается –

Нейтрализаторы

Целью разработчиков двигателей является создание таких двигателей, которые обеспечивали бы оптимальное использование энергии, низкий расход топлива и высокие показатели мощности и крутящего момента. Все эти характеристики должны сочетаться с еще одним существенным фактором: максимально низкой токсичностью ОГ при сгорании рабочей смеси.

Развитие электронных систем управления двигателем позволило обеспечить точное впрыскивание необходимого количества топлива и точную установку момента зажигания, а также оптимизацию управления всеми узлами, зависящими от режима работы двигателя, что наряду с повышением мощности двигателей, привело к заметному улучшению качества ОГ. Однако не следует пренебрегать и качеством топлива, требования к которому возросли также из-за увеличения мощности двигателей. Переход на неэтилированный бензин стал вехой на пути к обеспечению выпуска ОГ с низким содержанием вредных веществ.

Внедрение этих мер, начиная с 70-х гг., позволило уменьшить эмиссию неочищенных ОГ примерно на 80%. Но лишь за счет дополнительной очистки ОГ в каталитическом нейтрализаторе стало возможным соблюдать нормы по предельным значениям вредных веществ в ОГ.

Одним из способов снижения токсичности ОГ является использование **системы управления распределительным валом**, позволяющей изменять фазы газораспределения, а следовательно, иметь большие возможности в управлении процессом сгорания. Другим способом снижения эмиссии вредных веществ стало улучшение конструктивной формы камеры сгорания, а именно:

оптимизация геометрии камеры сгорания, многоклапанная технология, центральное положение свечи зажигания, двойное зажигание с двумя све-

чами зажигания для каждого цилиндра в многоклапанных двигателях, высокая степень сжатия, оптимизированное положение форсунки высокого давления при непосредственном впрыскивании. Снаружи двигателя устанавливаются другие системы и узлы, которые потенциально могут влиять на снижение выброса вредных веществ. Например: **системы, обеспечивающие дожигание ОГ; рециркуляция ОГ; система улавливания и дожигания паров топлива.**

Добавочная термическая обработка

Несгоревшее топливо при такте выпуска поступает в выпускную систему и, следовательно, не участвует в генерировании крутящего момента. По этой причине всегда образуется эмиссия СН и СО.

На холодном двигателе на стенках цилиндров конденсируется топливо, которое несгоревшим покидает камеру сгорания. Для того чтобы сохранить ровную и устойчивую работу двигателя, необходимо обогащать рабочую смесь на фазе прогрева двигателя, что приводит к резкому повышению концентрации СН и СО в неочищенных ОГ. Дело усложняется тем, что **каталитический нейтрализатор** для эффективного преобразования вредных веществ должен достичь своей минимальной рабочей температуры, составляющей около 300°C.

Поэтому, во-первых, важно минимизировать эмиссию неочищенных ОГ на стадии прогрева двигателя и, во-вторых, принять меры по ускорению нагревания каталитического нейтрализатора до его рабочей температуры. Мерами для снижения эмиссии неочищенных ОГ до момента начала эффективной очистки ОГ с **помощью каталитического нейтрализатора** являются:

- оптимизированные процессы пуска двигателя (моменты впрыска и зажигания);
- прогрев на обедненной смеси (предполагается возможность двигателя рабо-

тать на обедненных смесях);

- подача дополнительных порций воздуха.

Мерами, которые ускоряют включение **каталитического нейтрализатора** в работу, являются:

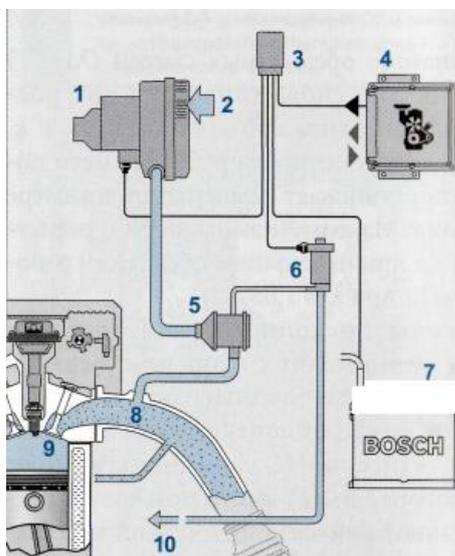
- высокая температура ОГ за счет установки более позднего опережения зажигания и обеспечения большего массового расхода газа;
- размещение каталитических нейтрализаторов рядом с двигателем;
- двойное впрыскивание на двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива.

Подача дополнительных порций воздуха

Электроприводный насос 1 (рис. 1) дополнительного воздуха всасывает воздух 2 и нагнетает его в выпускной тракт 8 в процессе управления клапаном 5 регулирования подачи дополнительных порций воздуха. Клапан не допускает обратного выхода ОГ в

систему управления воздухоподачи и поэтому при выключенном насосе должен оставаться закрытым.

- 1 Насос для подачи дополнительного воздуха
- 2 Поступление дополнительного воздуха
- 3 Реле
- 4 Электронный блок управления двигателем
- 5 Клапан регулирования подачи дополнительных порций воздуха



- 6 Управляющий клапан
- 7 Аккумуляторная батарея
- 8 Патрубок, связанный с выпускным трактом
- 9 Выпускной клапан
- 10 К впускному трубопроводу

Для включения насоса дополнительного воздуха требуется электрический ток большой силы, поэтому насос включается через реле 3. Электроуправляемый клапан 6 связан с клапаном 5 регулирования подачи дополнительных порций возду-

ха. Этот клапан 5 посредством электроуправляемого клапана управляет расходом воздуха между клапаном регулирования и впускным трубопроводом (клапан открывается) или наружным воздухом (клапан закрывается). Работа насоса и электроуправляемого клапана регулируется блоком управления двигателем 4 таким образом, что дополнительные порции воздуха могут подаваться точно в определенный момент, зависящий от условий работы двигателя.

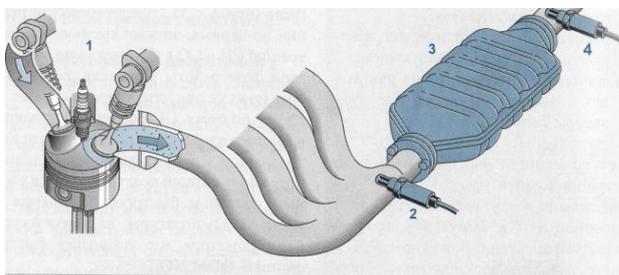
Дополнительный воздух должен подаваться в выпускной тракт как можно ближе к выпускному клапану 9, для того чтобы использовать высокую температуру для образования экзотермической реакции. При этом клапан дополнительного воздуха должен быть размещен не слишком близко от выпускного коллектора, так чтобы не допустить слишком высокой термической нагрузки. С другой стороны, очень важно предотвратить резонанс в трубопроводе между клапаном дополнительного воздуха и местом подачи этого воздуха в выпускной коллектор (так называемый эффект «курительной трубки»).

Дополнительный воздух необходим только после пуска двигателя при его прогреве (при $\alpha < 1$). Экзотермическая реакция, во-первых, снижает высокую концентрацию СН и СО в ОГ, имеющую место на этой фазе работы двигателя. Во-вторых, этот процесс окисления высвобождает теплоту, поэтому ОГ больше нагреваются и быстрее нагревают каталитический нейтрализатор. Следовательно, подача дополнительных порций воздуха является удобным способом быстрого нагревания до рабочей температуры каталитического нейтрализатора, что позволяет быстрее очищать ОГ от NO_x .

Каталитическая очистка отработавших газов

Нормами жестко регламентируются предельно допустимые величины эмиссии вредных веществ, образующихся при сгорании рабочей смеси в двигателях с искровым зажиганием. Для того чтобы можно было соблюдать эти нормы, требуются меры по дополнительной каталитической обработке ОГ.

Отработавшие газы пропускаются через каталитический нейтрализатор (3, рис. 1), расположенный в выпускном тракте, перед тем как они будут выпущены в окружающую среду.



1. Двигатель

2. Лямбда-зонд перед каталитическим нейтрализатором (использование двух точечного лямбда - зонда или широкополосного лямбда - зонда за-

висит от выбранной системы)

3. Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор

4. Двухточечный лямбда - зонд за каталитическим нейтрализатором (только в системах с двойным лямбда - управлением)

В каталитическом нейтрализаторе соответствующий слой каталитического покрытия обеспечивает вступление в химическую реакцию вредных веществ, содержащихся в ОГ, с преобразованием их в нетоксичные вещества. Лямбда - зонды (2 и 4, рис. 1) измеряют содержание остаточного кислорода в ОГ. Благодаря этому состав рабочей смеси может регулироваться так, чтобы каталитический нейтрализатор функционировал с максимальной эффективностью.

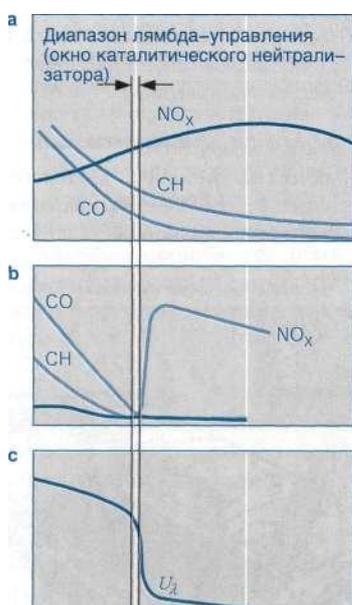
Со временем стали применяться каталитические нейтрализаторы с разными принципами работы. Современные двигатели, работающие на гомогенных смесях при $\alpha=1$, требуют использования трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Двигатели, работающие на обедненной рабочей смеси, дополнительно нуждаются в каталитическом нейтрализаторе с накопителем NO_x .

Окислительный каталитический нейтрализатор

Такой нейтрализатор преобразует углеводороды и оксид углерода, содержащиеся в ОГ, в водяной пар и углекислый газ путем окисления (сгорания). Кислород, необходимый для окисления, отбирается за счет установки режима

обедненной топливовоздушной смеси ($\alpha > 1$) или путем подачи воздуха в поток ОГ каталитическим нейтрализатором. Оксиды азота не могут преобразовываться в малотоксичные вещества этим нейтрализатором. Окислительные каталитические нейтрализаторы впервые начали использоваться на автомобилях в 1975 г. в связи с введением в США норм предельной токсичности ОГ. В настоящее время каталитические нейтрализаторы, работающие исключительно на принципе реакции окисления применяются весьма редко.

Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор



Такой нейтрализатор является элементом очистки ОГ как и двигателях с впрыскиванием топлива во впускной трубопровод, так и с непосредственным впрыскиванием топлива.

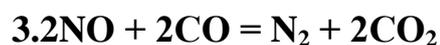
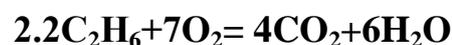
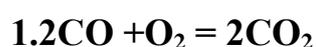
Перед трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором стоит задача преобразовывать в безвредные компоненты образующиеся при сгорании рабочей смеси вредные вещества —

углеводороды (CH), оксид углерода (CO) и оксиды азота (NO_x). В качестве конечного продукта образуется водяной пар (H₂O), углекислый газ (CO₂) и азот (N₂).

Принцип работы

Преобразование вредных веществ (очистка ОГ) осуществляется в две стадии: сначала оксид углерода и углеводороды преобразуются за счет окисления (уравнения 1 и 2).

Уравнения химических реакций в трехкомпонентном каталитическом нейтрализаторе



0,975 1,0 1,025 1,05
 Коэффициент избытка
 воздуха α . Обогащенная
 обедненная →
 смесь смесь

a — перед каталитической
 очисткой
 (неочищенные ОГ)
b — после каталитической
 очистки
c — характеристическая
 кривая
 изменения напряжения для
 двухточечного лямбда - зонда

Кислород, необходимый для окисления, имеется либо в виде остаточного кислорода в ОГ за счет неполного сгорания, либо он забирается у оксидов азота, количество которых таким образом снижается (уравнения 3 и 4). Концентрация вредных веществ в неочищенных ОГ зависит от коэффициента избытка воздуха α (рис. 2а). Уровень преобразования углеводородов и оксида углерода увеличивается с возрастанием ко-

эффициента избытка воздуха (рис. 2). При $\alpha = 1$ доля этих вредных компонентов еще очень мала. При более высоком коэффициенте избытка воздуха ($\alpha > 1$) концентрация этих вредных веществ остается на этом низком уровне. Степень преобразования оксидов азота в диапазоне обогащенной смеси ($\alpha < 1$) является приемлемой. Самая низкая концентрация NO_x соответствует

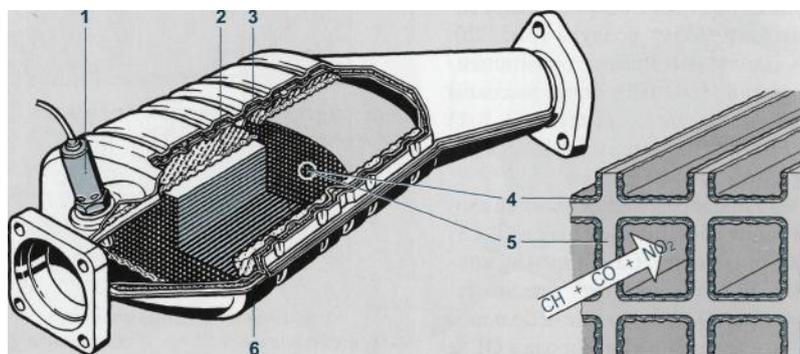
стехиометрической смеси ($\alpha = 1$). Но уже небольшое увеличение содержания кислорода в ОГ за счет повышения коэффициента избытка воздуха ($\alpha > 1$) препятствует снижению количества оксидов азота и резко повышает их концентрацию в ОГ.

Для того, чтобы процент преобразования трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором всех трех токсичных компонентов ОГ (CO , CH , NO_x) был как можно выше, эти компоненты должны находиться в ОГ в химическом равновесии. Для этого требуется стехиометрическое соотношение топлива и воздуха в рабочей смеси ($\alpha = 1,0$). Поэтому «окно», обеспечивающее значение α , очень близкое к единице, крайне мало. Смесеобразование должно регулироваться замкнутым контуром лямбда-управления.

Конструкция

1. Лямбда-зонд
2. Гофрированный подстилающий слой
3. Теплоизолирующая двойная оболочка
4. Абсорбционный слой (Al_2O_3 — несущий слой) с покрытием из благородных металлов
5. Подложка-носитель
6. Корпус нейтрализатора

Ка-
ли-
из
под-
ак-
ско-



талитический нейтра-
затор (рис. 3) состоит
стального корпуса 6,
ложки-носителя 5 и
тивного каталитиче-
го покрытия из благо-

родных металлов 4.

Подложка-носитель

Распространены два типа подложки-носителя: керамические и металлические монолиты.

Керамические монолиты

Керамические монолиты представляют собой керамические тела, пронизанные несколькими тысячами мелких каналов, по которым перепускаются ОГ. Керамика изготавливается из термостойкого магнезио-алюминиевого силиката. Монолит, чрезвычайно чувствительно реагирующий на механические напряжения, закреплен в металлическом корпусе. Для этого применяются минеральные расширяющиеся маты (2, рис. 3), которые при первом нагревании расширяются, надежно фиксируя монолит в требуемом положении.

Керамические монолиты являются наиболее часто применяемыми в настоящее время подложками-носителями каталитического покрытия.

Металлические монолиты

Металлический монолит, являющийся альтернативой керамическому, изготовлен из мелко гофрированной металлической фольги толщиной 0,05 мм и закреплен методом высокотемпературной пайки. Благодаря тонкостенной структуре, размещается больше газовых каналов на одной и той же площади. Это означает меньшее сопротивление пропуску ОГ, что важно для мощных форсированных двигателей.

Керамическое покрытие

Керамические и металлические монолиты требуют покрытия из оксида алюминия (Al_2O_3) — так называемый абсорбционный слой (4, рис. 3). Этот слой увеличивает эффективную поверхность каталитического нейтрализатора в 7000 раз. Нанесенный поверх него действующий каталитический слой содержит благородные металлы в окислительных каталитических нейтрализаторах — платину и/или палладий, а в трёхкомпонентных каталитических нейтрализаторах — дополнительно родий. Платина и палладий ускоряют окисление углеводородов и оксида углерода, а родий ускоряет очистку ОГ от оксидов азота. Содержание благородных металлов и каталитическом нейтрализаторе составляет около 1-3 г. Эта величина зависит от рабочего объема двигателя.

Условия работы

Рабочая температура

Температура каталитического нейтрализатора играет очень важную роль в обеспечении эффективности очистки ОГ.

Преобразование вредных в трехкомпонентном каталитическом нейтрализаторе начинается лишь при рабочей температуре свыше 300°C . Идеальные условия работы, обеспечивающие высокую степень очистки ОГ и длительный срок службы нейтрализатора, находятся в диапазоне температур $400 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

Термическое старение сильно возрастает в диапазоне $800 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ за счет спекания благородных металлов и слоя Al_2O_3 , что приводит к уменьшению активной поверхности нейтрализатора. При этом большое влияние оказывает также продолжительность работы в этом температурном диапазоне. Свыше 1000°C термическое старение сильно возрастает и приводит к полной утрате эффективности каталитического нейтрализатора. В результате нарушений в работе двигателя (например, перебои в зажигании) температура в каталитическом нейтрализаторе может подняться до 1400°C . Такие температуры приводят к полному разрушению каталитического нейтрализатора за счет плавления материала носителя-подложки. Чтобы этого не допустить, система зажигания должна работать особенно надежно и не требовать технического обслуживания. Современные системы управления двигателем могут определять перебои в зажигании и сгорании. Если необходимо, они прекращают впрыскивание топлива в соответствующий цилиндр, благодаря чему несгоревшая смесь не попадает в систему выпуска.

Неэтилированное топливо

Другим условием надежной и длительной работы нейтрализатора является работа двигателя на неэтилированном топливе. Соединения свинца осаждаются в порах активной внешней поверхности и снижают их количество. Несгоревшие частицы моторного масла, попадающие в ОГ, тоже могут «отравить» каталитический нейтрализатор, т. е. повредить его так, что он становится неэффективным.

Место установки

Строгие нормы по предельно допустимой токсичности ОГ требуют применение специальной концепции нагрева каталитического нейтрализатора при пуске двигателя. Эти концепции (например, подача дополнительных порций воздуха, установка более раннего момента ЗАЖИГАНИЯ) определяют место установки каталитического нейтрализатора. Необходимость соблюдения определенной рабочей температуры трехкомпонентного каталитического нейтрализатора определяет его местоположение. Из-за этих температурных условий, необходимых для высокой эффективности преобразования вредных веществ, необходима установка трехкомпонентного каталитического нейтрализатора рядом с двигателем. Главным образом, применяется схема раздельного размещения двух трехкомпонентных каталитических нейтрализаторов, первый из которых располагается рядом с двигателем, а второй (основной) — под днищем автомобиля. Нейтрализаторы, размещаемые рядом с двигателем, требуют оптимизации для обеспечения стабильной работы при высоких температурах, а основные каталитические нейтрализаторы, расположенные под днищем, оптимизируются для обеспечения эффективной очистки при низкой пусковой температуре, а так же высокой степени преобразования NO_x .

Альтернативой может быть только концепция общего каталитического нейтрализатора, установленного рядом с двигателем.

Эффективность

Каталитическая обработка ОГ с помощью трехкомпонентного каталитического нейтрализатора в настоящее время является самым эффективным методом очистки этих ОГ для бензиновых двигателей, работающих на гомогенных рабочих смесях при $\alpha = 1$. В эту систему включен замкнутый контур лямбда - управления, с помощью которого контролируется состав рабочей смеси. Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор может почти полностью очищать ОГ от таких вредных веществ, как оксид углерода, углеводороды и оксиды азота при гомогенном распределении и стехиометрическом составе рабочей смеси. Но эти идеальные режимы работы могут соблюдаться не всегда. Несмотря на это, в

среднем можно исходить из снижения количества вредных веществ в ОГ более чем на 98%.

Каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x

Назначение

При работе двигателя на обедненной рабочей смеси трехкомпонентный каталитический нейтрализатор не может полностью преобразовывать оксиды азота (NO_x), образующиеся при сгорании. В этом случае кислород для процесса окисления оксида углерода и углеводородов вместо кислорода, получающегося при расщеплении оксидов азота, используется остаточный кислород, находящийся в сравнительно большом количестве в ОГ. Каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x химически расщепляет оксиды азота другим способом.

Конструкция и специальное каталитическое покрытие

Каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x имеют конструкцию, сходную с трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором. В дополнение к каталитическому покрытию из платины, палладия и родия он имеет еще специальные добавки, которые способны накапливать оксиды азота. Типичными материалами, способными к накоплению, являются, например, оксиды калия, кальция, стронция, циркония, лантана или бария.

Покрытие для накопления NO_x и покрытие трехкомпонентного каталитического нейтрализатора могут наноситься на общий носитель-подложку.

Принцип работы

За счет имеющегося покрытия из благородных металлов каталитический нейтрализатор с накопителем

NO_x в режиме $\alpha = 1$ функционирует как трех компонентный каталитический нейтрализатор. Дополнительно он преобразует не уменьшившее, в обедненных

ОГ количество оксидов азота. Но это преобразование не осуществляется непрерывно, как в случае оксида углерода и углеводородов, а протекает в три стадии:

- 1) накопление NO_x ;
- 2) извлечение NO_x ;
- 3) преобразование.

Накопление NO_x

Оксиды азота (NO_x) каталитическим путем окисляются на поверхности платинового покрытия в диоксид азота (NO_2). Затем NO_2 вступает в реакцию со специальными оксидами на каталитической поверхности и с кислородом (O_2) с образованием нитратов. Так, например, NO_2 с оксидом бария BaO образует химическое соединение нитрат бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (см. уравнение 1). Благодаря этому каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x при работе двигателя на смеси с избытком воздуха обеспечивает накопление оксидов азота.

Существуют два разных способа определения фазы полного заполнения каталитического нейтрализатора:

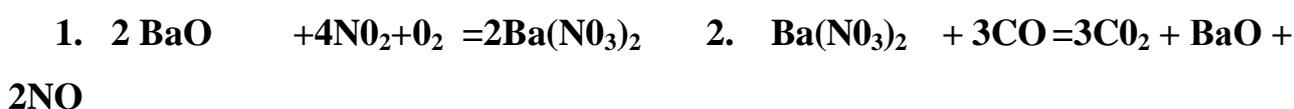
- способ моделирования, обеспечивающий расчет количества накопленных в нейтрализаторе NO_x с учетом температуры нейтрализатора;
- способ непрерывного измерения концентрации NO_x в ОГ с помощью датчика NO_x , расположенного за нейтрализатором.

Извлечение NO_x и их преобразование

По мере увеличения количества накопленных оксидов азота (загрузки) снижается способность дальнейшего химического связывания оксидов азота. С определенного их количества должна осуществляться регенерация, т. е. накопленные оксиды азота должны удаляться и преобразовываться. Для этого на короткое время происходит переключение работы двигателя на режим использования обогащенной гомогенной рабочей смеси ($\alpha < 0,8$). Процессы извлечения NO_x и преобразования их в азот и углекислый газ протекают отдельно, в качестве восстановителей используются H_2 , CH и CO . Самая низкая скорость реакции регистрируется при использовании CH , самая большая при H_2 . Процесс извлечения (рас-

смотрен при использовании оксида углерода в качестве восстановителя) осуществляется таким способом, при котором оксид углерода раскисляет нитрат, например, нитрат бария $Ba(NO_3)_2$ в оксид, например, оксид бария BaO . При этом образуются углекислый газ и монооксид азота (см. уравнение 2). Затем каталитическое покрытие из родия раскисляет оксиды азота посредством оксида углерода в азот и углекислый газ (см. уравнение 3).

Уравнения реакций для фаз накопления NO_x (1), извлечения (2) и преобразования (3)



Существуют два разных метода определения завершения фазы выдачи;

1. метод моделирования обеспечивает расчет количества NO_x , еще имеющегося в накопителе каталитического нейтрализатора;

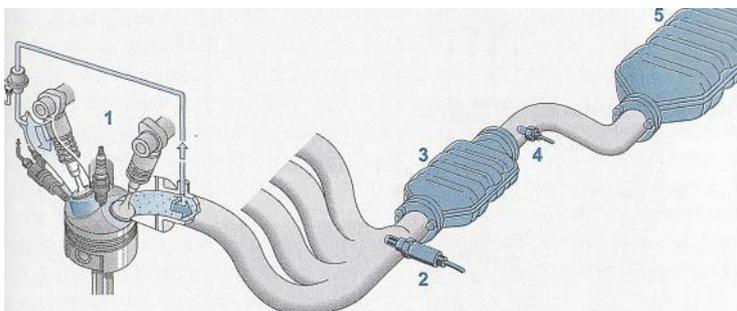
2. лямбда зонд (6 рис. 1) за каталитическим нейтрализатором измеряет концентрацию кислорода в ОГ за счет скачка напряжения при переходе из обедненного в обогащенный режим, показывая, что извлечение завершено.

Рабочая температура и место установки нейтрализатора

Способность этого каталитического нейтрализатора накапливать NO_x в сильной мере зависит от температуры. Она достигает максимума в диапазоне 300-400 °С. За счет этого рабочий диапазон температур намного ниже, чем у трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. По этой причине для каталитической очистки ОГ должны устанавливаться два отдельных каталитических нейтрализатора — трехкомпонентный каталитический нейтрализатор рядом с двигателем (передний) (3, рис. 1) и удаленный от двигателя каталитический нейтрализатор с накопителем NO , (5, рис. 1) в качестве основного.

Рис. 1

- 1. Двигатель с системой рециркуляции ОГ**
- 2. Лямбда-зонд перед каталитическим нейтрализатором**
- 3. Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор (передний)**
- 4. Температурный датчик**
- 5. Каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x (основной)**



6. Двухточечный лямбда-зонд, как вариант, используется с интегрированным датчиком NO_x

Влияние серы, содержащейся в топливе, на работу нейтрализатора

Сера, содержащаяся в бензине, может оказывать негативное влияние на работу каталитического нейтрализатора с накопителем. Сера в ОГ вступает в реакцию с оксидом бария (материал накопителя), образуя сульфат бария. Поэтому количество этого накопителя NO_x со временем уменьшается. Сульфат бария очень температуростойкий, поэтому лишь его незначительная часть расщепляется при регенерации NO_x .

При применении серосодержащего бензина должно осуществляться регулярное **десульфирование**. Для этого выбран такой способ, как нагрев каталитического нейтрализатора до температуры 600-650°C. Например, двигатель для этого может работать в условиях послойного распределения смеси, а богатые ($\alpha = 0,95$) и бедные ($\alpha = 1,05$) ОГ затем пропускаются одна за другой через нейтрализатор. При этом сульфат бария раскисляется в оксид

Контур лямбда - управления

Назначение

Для того чтобы в системах, оснащенных только трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором, поддерживался максимальный уровень преобразования всех трех токсичных компонентом ОГ, эти компоненты должны находиться в химическом равновесии. Для этого необходимо обеспечивать состав рабочей смеси со стехиометрическим соотношением ($\alpha=1,0$).

Поэтому окно, в котором должно находиться соотношение топлива и воздуха в смеси очень узкое. Единственным решением такой проблемы является применение замкнутого контура управления для регулирования этого соотношения в смеси. Разомкнутый контур управления в достаточной точности дозирования топлива не обеспечивает состава смеси со стехиометрическим соотношением ($\alpha = 1,0$).

Двигатели с непосредственным впрыскиванием топлива работают на смесях, состав которых отклоняется от стехиометрического соотношения. Для регулирования состава рабочих смесей в этих системах может также использоваться замкнутый контур управления.

КОСТРУКЦИЯ

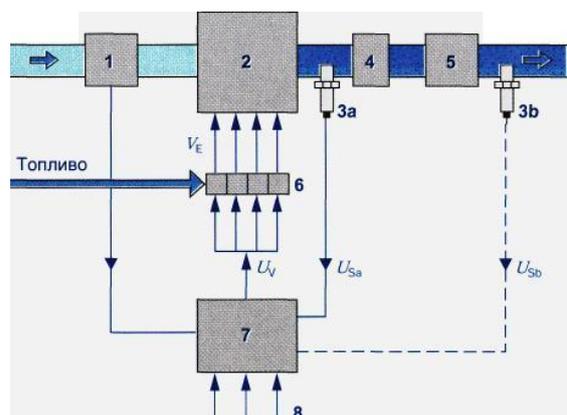


Рис.1

- 1. Датчик массового расхода воздуха**
- 2. Двигатель**
- 3а. Лямбда - зонд, расположенный до каталитического нейтрализатора предварительной очистки ОГ (двухточечный или широкополосный лямбда-зонд)**

3в. Двух точечный лямбда - зонд за основным каталитическим нейтрализатором (интегрированный датчиком NO_x , устанавливаемый только при необходимости на двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива)

4. Каталитический нейтрализатор предварительной очистки ОГ (трех - компонентный)

5. Основной каталитический нейтрализатор (при впрыскивании топлива во впускной трубопровод — трех компонентный, при непосредственном впрыскивании топлива — с накопителем NO_x)

6. Форсунки

7. Электронный блок управления двигателем

8. Входные сигналы

U_s — напряжение зон

да

U_v — напряжение включения форсунок

V_E — количество впрыскиваемого топлива

Лямбда-зонд 3а (рис.1) располагается в системе выпуска до переднего каталитического нейтрализатора 4. Сигнал зонда U_{sa} подается на блок 7 управления двигателем. Для этих целей может использоваться двухточечный (двухточечное управление) или широкополосный (непрерывное лямбда-управление) лямбда-зонд. За основным каталитическим нейтрализатором 5 может находиться второй лямбда -зонд 3в (двух зондовое регулирование), в качестве которого всегда используется двухточечный зонд. Он вырабатывает сигнал $U_{3в}$

Принцип работы

С помощью контура лямбда - управления могут распознаваться и корректироваться отклонения от определенного соотношения воздуха и топлива в смеси. Принцип управления базируется на измерении содержания остаточного кислорода в ОГ. Содержание остаточного кислорода является критерием состава рабочей смеси, поступающей в двигатель.

Двух точечное регулирование

Двух точечный лямбда-зонд, установленный перед каталитическим нейтрализатором, подает при обогащенной смеси ($\alpha < 1$) сигнал высокого, а при обедненной ($\alpha > 1$) — низкого напряжения U_{Sa} . Так как при $\alpha = 1$ возникает резкий скачок напряжения этого датчика, двухточечный лямбда-зонд может только показывать — обогащенная смесь или обедненная.

Выходной сигнал (напряжение) зонда в блоке управления двигателем преобразуется в бинарный сигнал, который является входным для замкнутого контура лямбда - управления, реализуемого с помощью программного обеспечения. Лямбда - управление непосредственно влияет на образование рабочей смеси и устанавливает точное соотношение и ней топлива и воздуха путем адаптации количества впрыскиваемого топлива. Регулируемая переменная может изменять значение в виде скачка или постепенно, управляя направлением изменения при каждом скачке напряжения зонда. Другими словами, резкое изменение регулируемой переменной приводит к изменению состава рабочей смеси. Это изменение происходит сначала резко затем постепенно. При высоком напряжении зонда (обогащенная смесь) регулируемая переменная обеспечивает изменение состава в сторону его обеднения, а при низком напряжении зонда (обедненная смесь) – в сторону обогащения смеси. С помощью этого так называемого двухточечного управления состав рабочей смеси может изменяться в диапазоне вблизи значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1$.

Типичный ошибочный сигнал лямбда – зонда, вызываемый изменениями состава рабочей смеси (богатая - бедная), может компенсироваться путем использования ассиметричной характеристической кривой регулируемой переменной.

Непрерывное лямбда-управление

Широкополосный лямбда зонд подает непрерывный сигнал напряжения U_{sa} . С его помощью не только определяется лямбда-зонд (обогащенная или обедненная смесь), но и измеряются отклонения от значения $\alpha = 1$. Благодаря этому лямбда - регулированием обеспечивается более быстрая реакция на отклонение состава смеси от значения $\alpha = 1$. Это дает лучшую регулировочную характеристику с высоким показателем динамического регулирования. .

Так как с помощью широкополосного лямбда - зонда могут определяться отклонения состава рабочей смеси от $\alpha = 1$, можно также (в отличие от двухточечного регулирования) менять состав таких смесей. Диапазон регулирования составляет от $\alpha = 0,7$ до $\alpha = 3,0$. В связи с этим непрерывное лямбда - управление пригодно для двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива, работающих на обедненной и обогащенной рабочих смесях.

Двух зондовое управление

Если лямбда - зонд расположен перед каталитическим нейтрализатором предварительной очистки ОГ, то он подвергается воздействию больших нагрузок (высокая температура, неочищенные ОГ). С другой стороны, основной лямбда-зонд (Зв, рис. 1) за каталитическим нейтрализатором подвергается этим воздействиям в существенно меньшей степени.

Лямбда - управление только с помощью зонда за каталитическим нейтрализатором было бы слишком замедленным из-за длительного времени прохождения газа к зонду. Принцип регулирования с использованием двух зондов базируется на том, что первый зонд управляет изменением состава смеси (богатая/бедная),

а второй (основной) зонд является частью замкнутого контура управления, обеспечивающего «медленную» дополнительную коррекцию состава смеси.

Замкнутый контур лямбда - управления для двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива

Каталитический нейтрализатор с накопителем NO_x обладает двойной функцией. Наряду с накоплением NO_x и окислением CH и CO при обедненной рабочей смеси, для условий $\alpha = 1$ он должен обладать такой стабильной функцией очистки от токсичных компонентов ОГ, которая обеспечивает минимальный уровень накопления кислорода. Лямбда - зонд перед каталитическим нейтрализатором контролирует стехиометрический состав рабочей смеси.

Двухточечный зонд за каталитическим нейтрализатором с накопителем NO_x и встроенным датчиком NO_x не только является частью системы управления с помощью двух зондов, но также контролирует работу комбинированного накопителя O_2 и NO_x (определение завершения фазы извлечения NO_x).

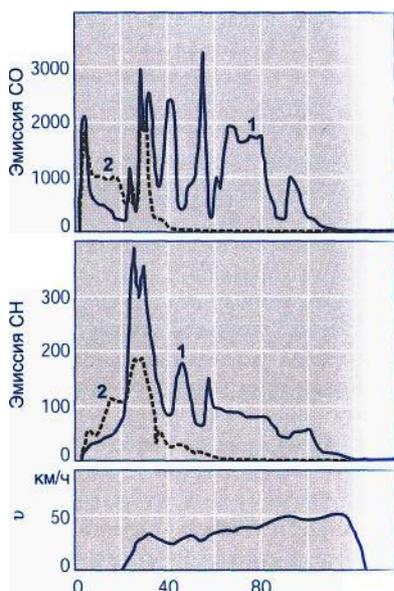
Нагревание каталитического нейтрализатора Уменьшение угла опережения зажигания.

Для того чтобы сохранить концентрацию вредных веществ и ОГ на минимальном уровне, каталитический нейтрализатор должен быть разогрет до своей рабочей температуры как можно быстрее. Помимо прочего, это достигается путем уменьшения угла опережения зажигания.

Эта мера снижает мощностные характеристики двигателя и приводит к получению более высоких температур ОГ, что также способствует нагреву каталитического нейтрализатора.

Подача дополнительных порций воздуха

Несгоревшие компоненты рабочей смеси, которые еще находятся в ОГ, сгорают при использовании процесса термодожигания.



Необходимый для этого кислород имеется в самих ОГ при обедненном составе смеси в виде остаточного кислорода. При обогащенной смеси, которая часто бывает необходимой для прогрева двигателя до его рабочих температур, дополнительные порции воздуха подаются в выпускной тракт для ускорения процесса прогрева двигателя.

Эта экзотермическая реакция, с одной стороны, снижает количество углеводородов и

оксида углерода в ОГ, а с другой стороны, дожиганием также нагревается каталитический нейтрализатор, что быстро доводит его до рабочей температуры. Этот процесс существенно повышает степень преобразования токсичных компонентов в ОГ на стадии прогрева и ускоряет готовность

Влияние подачи дополнительных порций

воздуха на эмиссию СО и СН

1 Без подачи дополнительных порций воздуха

2 При подаче дополнительных порций воздуха

v — скорость движения автомобиля

каталитического нейтрализатора к работе. На рис. 1 показаны кривые изменения эмиссии углеводорода и оксида углерода в первые секунды испытаний с подачей дополнительных порций воздуха и без этой подачи.

При современном уровне развития техники подача дополнительного воздуха осуществляется электроприводным насосом.

Дополнительное впрыскивание топлива

Для бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива существует другой метод, быстрого нагревания каталитического нейтрализатора до рабочей температуры. В условиях послойного распределения заряда смеси с большим избытком воздуха и нагревания каталитического нейтрализатора производится дополнительное впрыскивание топлива при рабочем ходе поршня. Это топливо сгорает очень поздно, что приводит к сильному нагреву системы выпуска, в том числе выпускного коллектора. За счет этого, в тех случаях когда нельзя достичь установленных предельных значений токсичности ОГ, можно отказаться от подачи дополнительных порций воздуха во впускной трубопровод.

5. Техническое состояние двигателя.

Интенсивность дымления и токсичность О. Г. сильно зависят от технического состояния и регулировок топливоподающей аппаратуры. Недопустимы подтекание топлива в распылителе, неправильная регулировка давления начала впрыскивания, зависание иглы распылителя и т. п.

Большое значение имеет тепловое состояние распылителя. Перегрев распылителя выше 180—210°С приводит к его закоксовыванию, нарушению характеристики впрыскивания, ухудшению равномерности распыливания и подачи топлива через отдельные отверстия. В этом случае увеличиваются дымность и токсичность О. Г. При засорении воздухоочистителя или потере герметичности клапанов токсичность О. Г. может возрасти в ре-

зультате снижения наполнения цилиндров и компрессии. В изношенном дизеле в пристеночную зону цилиндра попадают частички масла, что увеличивает выброс бенз-а-пирена в 8—10 раз. Правильная эксплуатация, т. е. поддержание дизеля в хорошем техническом состоянии, и стабильность регулировок топливной аппаратуры в сочетании с систематическим контролем дымности и токсичности О. Г. позволяют снизить общий выброс токсичных веществ на 30—40%.

ЛЕКЦИЯ №9. ФИЛЬТРЫ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Классификация фильтров (с навивкой, монолитные, сегментные, циклонные)
2. Характеристики фильтров

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛЕКЦИИ

1. Классификация фильтров

В ОГ двигателей размер содержащихся дисперсных частиц составляет, в основном, от 10 нм (0,010 мкм) до 1,0 мкм; возможно присутствие дисперсных частиц (PM) размером до 10...50 мкм. При этом, наиболее вероятный размер частиц для дизелей — около 60 нм, а для бензиновых ДВС — около 10 нм. Количество частиц — до $10^7 \dots 10^{10}$ штук в 1 см^3 . При этом, концентрация частиц и распределение их по размеру зависит и от режимов работы ДВС, и от типа самого двигателя, и от наличия средств обработки ОГ.

Фильтры твердых частиц (Diesel Particle Filter — DPF) предназначены для снижения содержания в ОГ дизелей частиц сажи и твердых сульфатов посредством их сбора на фильтрующем элементе. Принципиально конструкция DPF мало отличается от конструкции нейтрализаторов газообразных веществ: поток ОГ проходит через проницаемые стенки, которые пропускают газообразные составляющие, но задерживают твердые. Установка фильтров твердых частиц экономически целесообразна при уровне дымности отработавших газов не более 30...35%. При более высоком уровне дымности ОГ существенно возрастают затраты на их очистку.

В настоящее время известны 2 основных типа фильтров: с навивкой и монолитные керамические. Другие типы фильтров являются производными от этих двух принципиальных схем. Фильтр с навивкой представляет собой несколько отдельных трубок, через которые отработавшие газы проходят от внешней стороны к внутренней. Фильтрующим элементом является керамиче-

ская нить, накрученная в несколько слоев на перфорированные стальные трубки. Техника намотки и состояние поверхности керамической нити являются элементами, варьируя которые можно изменять эффективность фильтра. Монолитный фильтр представляет собой множество поочередно закрытых на концах каналов. Эффективность такого фильтра зависит от пористости и толщины керамических стенок. Этим же обуславливается и объем фильтра, и величина оказываемого им сопротивления. Монолитные фильтры бывают двух основных типов: собственно монолитные и сегментные, т. е. сложенные из нескольких сегментов, соединенных между собой связующим компонентом. Циклонные сажетоделители работают по принципу пропускания отработавших газов через винтообразные устройства, где твердые частицы под действием сил инерции отбрасываются на периферию — в накопители. Однако их эффективность невелика, так как воздействуют они только на самые тяжелые частицы — размером более 2,5 мкм.

Эффективность фильтров зависит также от способа изготовления самого блока: либо из вспененного материала, либо из пористого. Эффективность в последнем случае выше: противодавление ниже, обеспечивается задержка более мелких частиц. В фильтрах используется самая различная керамика: кристобалит, протоэнстатит, кордиерит, сапфирин, муллит, периклаз, шпинель, корунд. Наиболее широко распространен кордиерит ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), имеющий удовлетворительные физико-химические характеристики: коэффициент теплового расширения — около 0, не размягчается и при температуре свыше 1400 °С, обладает высокой механической прочностью при высоких температурах, предел текучести возрастает по мере прогревания до 1200 °С. Пористая структура обеспечивает высокую совместимость с катализаторами из благородных металлов.

Фильтры выпускаются двух видов: имеющие каталитическое покрытие (Catalyzed DPF — CDPF) и постоянно регенилируемые (Continuously Regenerated DPF — CRDPF). Существуют байпасные системы с перепуском отработав-

ших газов мимо фильтра в момент регенерации либо через другой фильтр, либо через глушитель.

2. Характеристики фильтров

Если стенки DPF покрыты катализатором, то фильтр работает как каталитический нейтрализатор; если катализатора нет, то как термический нейтрализатор. Наличие серы в топливе обуславливает необходимость повышения температуры ОГ для обеспечения регенерации фильтра, причем, степень повышения температуры выше для CDPF, чем для CRDPF. При этом активность по углеводородам достигает 70% для CDPF и 85% для CRDPF. Установка фильтров приводит к повышению противодавления ОГ, причем для фильтров типа CRDPF — противодавление выше; в результате ухудшается топливная экономичность двигателя (до 2%).

Характеристики монолитных фильтров определяются их пористостью. Считается, что фильтр высокоэффективен при линейном размере пор не более 12 мкм, при размерах 12...35 мкм — среднеэффективен, при размерах пор более 35 мкм — малоэффективен. Количество пор — от 60 до 100 на 1 см². Размеры самих фильтров (диаметр и длина) колеблются: 150□ x150 мм — для легковых автомобилей; 300□□ 300 мм — для грузовых автомобилей и автобусов; 380□□ 380 мм — для горных машин и стационарных крупных дизелей. Для примера в табл. 1 и 2 приведены характеристики двух наиболее распространенных типов материалов для фильтров: собственно материала, а также компонента, связующего отдельные элементы фильтра.

Характеристики материалов противосажевых фильтров

| Параметр и единицы измерения | Материал фильтров | |
|------------------------------|-------------------|-------|
| | EX-47 | EX-66 |
| Плотность пор, см | 15,5 | 15,5 |
| Толщина стенок, мм | 0,430 | 0,635 |
| Пористость стенок, % | 50 | 45 |
| Средний размер пор, мкм | 12 | 35 |
| Плотность, г/см ³ | 0,39 | 0,54 |

| | | |
|--|----------------------|----------------------|
| Коэффициент термического расширения (25...800 °С), 1/°С | $9,4 \times 10^{-7}$ | $8,4 \times 10^{-7}$ |
| Эффективность улавливания, % | 90 | 60 |

Характеристики связующего компонента РС - 2

| Параметр и единицы измерения | Значения параметров |
|---|----------------------|
| Пористость, % | 55 |
| Средний размер пор, мкм | 12 |
| Плотность, г/см ³ | 1,19 |
| Коэффициент термического расширения, 1/°С | $9,2 \times 10^{-7}$ |
| Прочность на изгиб, кПа | 9,34...11,06 |
| Модуль упругости (25 °С), кПа | $14,5 \times 10^6$ |
| Параметр стойкости к термическим ударам (25...100 °С) | 573 |

Большая проблема для всех типов и конструкций фильтров — это их регенерация, т. е. восстановление функциональных свойств. Лучшие образцы фильтров способны эффективно работать в течение 10...12 часов (в ходе пробега до 550 км, т. е. фактически один раз в сутки, что позволяет производить эту операцию в ночное время, когда транспортное средство (ТС) не эксплуатируются. После чего их сопротивление становится недопустимо высоким из-за большого скопления твердых частиц.

Система регенерации включает в себя топливную горелку с подачей дизельного топлива (хотя возможно использование бензина, газа и других топлив), устанавливаемую до фильтрующего блока по ходу движения отработавших газов. Момент начала регенерации определяется автоматически с помощью электронного блока управления по контрольным показателям, обычно — величине противодавления ОГ. Подобная система, устанавливаемая на транспортном средстве, позволяет обеспечивать процесс регенерации без отвлечения внимания водителя.

Регенерация производится посредством выжигания дисперсных частиц путем повышения температуры фильтра за счет электроподогрева либо пропус-

кания горячих газов от автономной горелки. Температура фильтра при этом должна быть не менее 800 °С, чтобы твердые частицы выгорали с гарантией. Продолжительность регенерации — 3...5 мин. Расход топлива (при использовании горелки) — около 0,5 л (для двигателя мощностью 150,0 кВт мощность горелки должна составлять приблизительно 25,0 кВт). При регенерации необходимо обеспечивать равномерный нагрев всего тела фильтра, что крайне сложно. Это обусловлено тем, что, во-первых, горячий газ начинает остывать сразу после удаления от источника высокой температуры; во-вторых, сажа в фильтре обычно распределена неравномерно, и, выгорая, дополнительно нагревает прилегающие зоны. В результате, одни зоны фильтра нагреваются до 1400 °С и выше, а другие — не достигают и 600°С (нижний уровень воспламенения сажи). Для гарантированного выгорания сажи поверхность каналов фильтра покрывают катализатором: обычно, благородными металлами или медью, что приводит к снижению температуры воспламенения сажи с 600...700 до 300...400 °С. Для снижения температуры выгорания сажи (в момент регенерации) до 200...300 °С используют микроприсадки в топливо — ферроцены, оксид циркония.

Одним из типов противосажевого фильтра является фильтр Electrocats DPF, способный функционировать при достаточно низких температурах ОГ за счет применения плазменной регенерации. При этом фильтр нечувствителен к содержанию серы в топливе. Возникающая при работе фильтра плазма - ионизированный из-за воздействия тока газ - становится химически активной в связи с наличием в ней электронов и свободных радикалов.

Современные нормативные требования к составу отработавших газов ДВС обусловили необходимость применения комплексного подхода к решению проблемы экологической чистоты двигателей и транспортных средств. Т.е. исследователи не только создают малотоксичные рабочие процессы и используют улучшенные топлива, но и применяют одновременно несколько средств обработки ОГ: нейтрализаторы (первичные, основные, дожигающие) и

фильтры дисперсных частиц при обязательном наличии электронного регулирования (EDC — Electronic Drive Computer).