

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Набережночелнинский институт (филиал)

В.Н. Никишин, Е.П. Барыльникова

**Обеспечение экологической безопасности
автотранспортного комплекса**

Учебное пособие

2019

УДК 621.431.7.068.4:629.33(075.8)

*Рекомендовано по решению редакционно-издательского совета
Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) федерального университета*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **Кулаков А.Т.**
кандидат технических наук **Малаховецкий А.Ф.**

Никишин В.Н. Обеспечение экологической безопасности автотранспортного комплекса : учебное пособие / В.Н. Никишин, Е.П. Барыльникова. – Набережные Челны, 2019. – 232 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы обеспечения экологической безопасности на автомобильном транспорте. Отражены негативные воздействия транспорта на окружающую среду.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Наземные и транспортно-технологические комплексы», «Энергетическое машиностроение», а также «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Учебное пособие может быть использовано в практической деятельности инженерно-техническими работниками при разработке, доводке и производстве двигателей, а также работниками сервисных, автотранспортных и ремонтных предприятий.

© Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ ВО К(П)ФУ, 2019
© Никишин В.Н., Барыльникова Е.П., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.....	10
1.1 Виды воздействий автомобильного транспорта на окружающую среду.....	10
1.2. Основные загрязнители автомобильного транспорта.....	12
Контрольные вопросы к главе 1.....	18
ГЛАВА 2. ВИДЫ ТОПЛИВ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА.....	19
2.1. Бензины.....	19
2.1.1. Основные характеристики и требования к бензину...	19
2.1.2. Ассортимент бензинов	22
2.1.3. Экология бензинов.....	27
2.2. Дизельные топлива.....	32
2.2.1. Основные характеристики и требования к дизельным топливам.....	32
2.2.2. Ассортимент дизельных топлив	35
2.3. Газообразное топливо.....	40
2.3.1. Сжиженные газы.....	41
2.3.2. Сжатые газы.....	45
2.4. Альтернативные виды топлив.....	48
Контрольные вопросы к главе 2.....	57
ГЛАВА 3. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ.....	58
3.1. Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.....	59
3.2. Образование продуктов неполного сгорания топлива.....	62
3.2.1. Сажа.....	62
3.2.2. Окись углерода.....	66
3.2.3. Несгоревшие углеводороды C_nH_m	68
3.2.4. Альдегиды.....	70
3.3. Окислы азота.....	71
Контрольные вопросы к главе 3.....	76

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ.....	77
4.1. Методы отбора газовых проб для оценки выброса вредных веществ отработавшими газами.....	77
4.2. Методы испытания с целью определения выбросов вредных веществ и дымности отработавших газов.....	79
4.3. Испытательные циклы.....	80
4.3.1. Федеральный цикл FTR-75.....	80
4.3.2. Европейский испытательный цикл.....	82
4.3.3. Усовершенствованный европейский цикл.....	85
4.3.4. Калифорнийский цикл.....	86
4.3.5. Японские циклы.....	87
4.3.6. 13-ти ступенчатый цикл.....	89
4.4. Переходный цикл ETC.....	91
4.5. Испытательный цикл ELR.....	93
4.6. Оценка токсичности автомобиля.....	94
4.7. Показатели качества воздуха.....	95
4.8. Условная суммарная токсичность отработавших газов автомобиля.....	99
Контрольные вопросы к главе 4.....	100
ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЯ.....	101
5.1. Методы оценки токсичности газовых проб.....	101
5.2. Хроматографический анализ.....	102
5.3. Оптические газоанализаторы.....	105
5.4. Оптико-акустические газоанализаторы.....	107
5.5. Пламенно-ионизационные газоанализаторы (fid).....	109
5.6. Хемилюминесцентные газоанализаторы (cld).....	110
5.7. Термокондуктометрические газоанализаторы.....	111
5.8. Оборудование, используемое для испытаний автомобильных дизелей на дымность отработавших газов...	112
5.8.1. Оптический метод. Дымомер фирмы «Хартридж»....	113
5.8.2. Метод прокачки через фильтр. Дымомер фирмы «Бош».....	115
Контрольные вопросы к главе 5.....	117

ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ	118
6.1. Влияние состава рабочей смеси на выбросы вредных веществ с отработавшими газами.....	118
6.2. Влияние нагрузки на выбросы вредных веществ с отработавшими газами.....	119
6.3. Влияние частоты вращения коленчатого вала на выбросы вредных веществ с отработавшими газами	121
6.4. Влияние конструкции камеры сгорания на выбросы вредных веществ с отработавшими газами.....	123
6.5. Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы вредных веществ с отработавшими газами	126
6.5.1. Бензиновые двигатели. Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы вредных веществ с отработавшими газами.....	129
6.5.2. Дизели. Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы Вредных веществ с отработавшими газами.....	129
Контрольные вопросы к главе 6.....	133
ГЛАВА 7. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЕЙ.....	134
7.1. Применение на автомобилях двигателей с принудительным зажиганием.....	134
7.1.1. Причины появления и снижение продуктов неполного сгорания.....	135
7.1.2. Причины появления и снижение окислов азота.....	136
7.1.3. Сгорание с недостатком кислорода в зоне горения....	137
7.2. Применение на автомобилях дизельных двигателей.....	138
7.3. Воздействие изменением на автомобилях состава смеси.....	139
7.4. Угол опережения зажигания.....	140
7.5. Применение на автомобилях углов перекрытия клапанов.....	142
7.6. Применение на автомобилях различных степеней сжатия.....	144
7.7. Воздействие изменением состава смеси дизеля.....	145

7.8. Воздействие изменением угла опережения впрыскивания топлива.....	146
7.9. Воздействие изменением качества смесеобразования.....	147
7.10. Воздействие применением предварительное смесеобразование.....	148
7.11. Воздействие подогревом впускного коллектора	149
7.12. Применение распределенного впрыска топлива.....	149
7.13. Воздействие путем послынного смесеобразование.....	154
7.14. Применение в двигателе двуполостных камер сгорания.....	158
7.15. Непосредственный впрыск топлива.....	159
7.15.1. Общие сведения.....	161
7.15.2. Принцип действия системы GDI.....	162
7.15.3. Приборы подачи топлива.....	164
7.16. Приготовление горючей смеси.....	170
7.16.1. Работа двигателя при послынном распределении смеси.....	173
7.16.2. Работа двигателя при гомогенном распределении смеси.....	177
7.16.3. Работа двигателя при гомогенно-обедненном распределении смеси.....	179
7.17. Форкамерно-факельное зажигание.....	181
7.18. Расширение многотопливности автомобильных дизелей.....	183
7.19. Применение на автомобилях использование принудительного зажигания в дизелях.....	185
7.20. Применение на автомобилях многофазная подача топлива.....	185
7.21. Применение на автомобилях система изменения фаз газораспределения (VTC).....	187
7.22. Применение на автомобилях рециркуляция отработавших газов.....	190
7.23. Применение на автомобилях каталитической нейтрализации система SCR.....	194
7.24. Применение впрыска воды к воздуху или топливу.....	200
7.25. Снижение дымности и токсичности отработавших газов автомобилей применением присадок к топливу.....	203

7.25.1. Применение в автомобилях присадки.....	203
7.25.2 Применение в автомобилях присадок к бензинам.....	207
7.26. Уменьшение токсичных выбросов с картерными газами и из топливной системы двигателя.....	209
7.26.1. Система вентиляции картера двигателя.....	209
7.26.2. Система улавливания паров бензина.....	211
7.27. Интенсификация зажигания.....	213
7.28. Нейтрализация отработавших газов.....	216
7.28.1. Пламенные (термические) нейтрализаторы отработавших газов.....	216
7.28.2. Применение на автомобилях каталитических нейтрализаторов отработавших газов.....	221
Контрольные вопросы к главе 7.....	229
ЛИТЕРАТУРА.....	231

ВВЕДЕНИЕ

Транспортно-дорожный комплекс является одним из главных составляющих элементов народного хозяйства страны. Массовое применение транспортных средств во всех отраслях экономики и социальной сфере повлекло за собой мощное негативное воздействие на природу. В процессе перевозок в большом количестве потребляются топливно-энергетические ресурсы, и происходит значительное выделение загрязняющих веществ в окружающую среду.

В Российской Федерации общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от работы автомобильного транспорта составляет свыше 70 % от общего объема всех видов транспорта, и около 40% общего количества загрязнения окружающей среды.

По оценке Росприроднадзора¹ выбросы от отдельных видов передвижных источников в составе автомобильного транспорта в воздушный бассейн приблизительно оцениваются в 14,5-15 млн т/год. В определенной степени загрязнение окружающей среды зависит и от возраста автотранспортных средств, находящихся в эксплуатации. Так, доля транспортных средств возраста до 5 лет составляет чуть более четверти (26,5%) от общего количества; транспортные средства старше 5 лет составляют 72,6% от общего количества. Лидирующее положение в данной категории занимает транспорт возрастом свыше 15 лет (35,9% от общего количества), немного уступает ему транспорт возрастом от 5 до 10 лет (22,1%).

Значимую роль в формировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферу играют и виды моторного топлива, которые используются транспортными средствами.

Отработанные газы двигателей внутреннего сгорания содержат свыше 200 наименований вредных веществ, в том числе и канцерогенных.

При сохранении современных тенденций роста парка и потребления нефтепродуктов к 2020 г. доля транспортных средств

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году».

в общем объеме выбросов двуокиси углерода (CO₂) может вырасти до 70 %.

Доля автомобильного транспорта в выбросе вредных веществ составляет в США - 60,6%, в Англии - 33,5%, во Франции - 32%. В России этот показатель составляет 43%.

В ряде стран мира, таких как США, Япония, Скандинавские страны, страны ЕЭК ООН, Российская Федерация законодательством введены ограничения на выбросы токсичных веществ автомобильным транспортом.

Поэтому, наряду с улучшением технико-экономических показателей работы транспорта, уменьшение загрязнения и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду становится одной из важнейших проблем государства.

ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

1.1. Виды воздействий автомобильного транспорта на окружающую среду

В настоящее время окружающая среда подверглась изменениям вследствие антропогенного влияния. Человек, осуществляя деятельность, создает не только полезный продукт, но и порождает побочные процессы и явления, которые воздействуя на природу, загрязняют и уничтожают ее.

Транспорт является одним из ключевых элементов экономики страны, обеспечивающий экономический рост и социальное развитие общества.

Значимы все виды транспорта, но наибольшая роль отведена автомобильному транспорту. Его развитие повлекло за собой изменения во всех секторах народного хозяйства, сыграло важную роль в особенностях территориального расселения людей, размещения отраслей промышленности и сферы обслуживания. Известные преимущества автомобильного транспорта (доставка «от двери до двери», скорость, гибкость, надежность и т.д.) в сравнении с другими видами транспорта позволяют рассматривать его как рыночно-ориентированный вид транспорта, что в свою очередь предопределило бурный рост автомобилизации.

Массовая автомобилизация обеспечила рост работы не только предприятий автотранспортного комплекса, но и других ресурсно обеспечивающих его деятельность отраслях экономики (автомобилестроение, металлургия, химическая промышленность, топливно-энергетический комплекс).

Функционирование автомобильного транспорта с одной стороны, определяет необходимость потребления природно-энергетических ресурсов, но с другой стороны способствует тому, что в окружающую среду поступают различные загрязняющие вещества и отходы производственной деятельности, тем самым нанося экологический ущерб природе.

В масштабах страны, выбросы загрязняющих веществ от работы автомобильного транспорта достигают порядка 43% от

общего объема загрязняющих веществ, создаваемых всеми техногенными источниками.

Эта проблема особенно усугубляется с бурным ростом автомобилизации, что в свою очередь способствует появлению других экологических проблем, связанных с производством автотранспортных средств, агрегатов и узлов, эксплуатационных материалов.

Другой факт негативного влияния - размещение объектов инфраструктуры автомобильного транспорта. Происходит отчуждение территорий под автостоянки, автомобильные дороги, под предприятия для обслуживания и ремонта автотранспортных средств, деятельность которых сопровождается загрязнением воздуха, воды, почвы, угнетением и уничтожением растительности.

Серьезный урон окружающей среде от деятельности автомобильного транспорта выражается в двух аспектах:

- в потреблении большого количества природно-энергетических ресурсов;
- в значительном выделении загрязняющих веществ в окружающую среду.

Основными потребляемыми ресурсами являются:

- атмосферный воздух, который необходим для протекания рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания (ДВС);
- нефтепродукты и природный газ, используемые в качестве топлива;
- водные ресурсы для нужд автотранспортных предприятия, мойки транспортных средств, для систем охлаждения ДВС;
- земельные ресурсы, отчуждаемые под строительство транспортной инфраструктуры.

Негативное влияние автомобильного транспорта проявляется в виде следующих воздействий:

- загрязнение воздушного бассейна, засорение водных объектов и разрушение почвенно-растительного покрова земель при строительстве автомобильных дорог, эксплу-

- атации автотранспортных средств и деятельности автопредприятий;
- выделение тепла в окружающую среду при работе ДВС и оборудования автотранспортного производства;
 - высокий уровень шума и вибраций;
 - травматизм и гибель людей и животных;
 - нанесение большого материального ущерба при авариях.

1.2. Основные загрязнители автомобильного транспорта

В общем объеме загрязняющих веществ по видам транспорта на долю автомобильного транспорта приходится около 89%.

Автотранспортные средства.

По данным аналитических агентств автомобильный парк России насчитывает 52 млн. единиц техники, в том числе 84% или 43,5 млн единиц легковых автомобилей, 8% или 4,1 млн единиц легких коммерческих автомобилей, 7% (3,8 млн единиц) – грузовых и 1% (0,4 млн единиц) автобусов. Отмечается устойчивая тенденция роста численности автотранспортных средств, находящихся в личном пользовании.

В определенной степени загрязнение окружающей среды зависит и от возраста автотранспортных средств, находящихся в эксплуатации. Так, доля транспортных средств возраста до 5 лет составляет чуть более четверти (26,5%) от общего количества; транспортные средства старше 5 лет составляют 72,6% от общего количества. Лидирующее положение в данной категории занимает транспорт возрастом свыше 15 лет (35,9% от общего количества), немного уступает ему транспорт возрастом от 5 до 10 лет (22,1%).

По данным «АВТОСТАТ» в настоящее время эксплуатируются порядка 60% грузовых автомобилей, срок эксплуатации которых выше нормы. Из общего числа 19,9 % автомобилей имеют срок службы до 5 лет, 18,8% - свыше 5 лет и до 10 лет, около 61% грузовых автомобилей полностью самортизированы и имеют срок службы более 10 лет.

Таблица 1.1

Возрастная структура парка грузовых автомобилей, %

Возраст парка	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
до 5 лет	14,4	14,0	17,0	17,0	16,2	21,8	20,2	19,9
5,1 – 10 лет	34,8	23,5	19,0	18,6	19,5	20,1	19,3	18,8
более 10 лет	50,8	62,5	64,0	64,4	64,3	58,1	60,5	61,3

По типу топлива в эксплуатации преобладают грузовые автомобили, работающие на дизельном топливе (табл. 1.2), на их долю приходится около 59% от общего числа автомобилей.

Таблица 1.2

Грузовая техника в зависимости от вида топлива, тыс. единиц

	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Бензин	846	519	310	283	260	243	234	212
Дизельное топливо	433	326	292	298	325	340	347	341
Природный газ в качестве моторного топлива	-	-	-	-	-	-	18	18
Другие виды топлива	22	31	26	26	26	26	9	8

Экологический ущерб от эксплуатации автотранспортных средств обусловлен токсичными выбросами. Ежегодно автотранспортными средствами выбрасывается в атмосферу более миллионов тонн различных загрязняющих веществ.

Структура грузового парка по нормам токсичности удручающая. В сегменте грузовых автомобилей зарегистрировано 3,8 млн. единиц техники из них по нормам токсичности от общего числа не удовлетворяет свыше 65%.

Такая эксплуатация приводит к непроизводительному расходу топлива и увеличению выброса в атмосферу загрязняющих веществ.

Являясь крупнейшим потребителем природного топлива, автотранспорт существенно влияет на увеличение концентрации

в атмосфере углекислого газа и, тем самым, влияет на процесс глобального потепления климата в мире.

В составе отработавших газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) содержатся сотни вредных компонентов, однако наиболее существенными являются: оксид углерода (CO), углеводороды (CH), оксиды азота (NO_x), твердые частицы (ТЧ), соединения свинца (Pb) и серы (SO₂), альдегиды, а также канцерогенные вещества. Важное значение начинает приобретать загрязнение атмосферы диоксидом углерода (CO₂), в больших количествах содержащимся в отработавших газах автомобилей. Этот газ играет основную роль в формировании парникового эффекта планеты - явления, устранение которого в настоящее время стало глобальной проблемой.

Состав отработавших газов ДВС зависит от вида используемого топлива и присадок к нему, типа организации и совершенства рабочего процесса, условий эксплуатации, технического состояния и т.д.

Наибольшее количество загрязняющих веществ образуется при сгорании бензина и дизельного топлива. Их замещение альтернативными видами моторного топлива (например, газом) позволяет решить сразу две задачи:

1) снизить экологическую опасность автомобилей;

2) сократить использование нефти, так как на потребности автомобильного транспорта тратиться более 50 % от общего количества её добычи.

По данным исследований [9] по количеству выбросов наиболее опасных загрязняющих веществ лидирует бензиновый двигатель. На рис. 1.1 представлены данные по содержанию загрязняющих веществ в отработавших газах ДВС, работающих на различных видах топлива. За 100 % приняты выбросы бензинового двигателя. Исключение составляет сажа, максимальный выброс которой характерен для дизельного ДВС, на графике для него её выброс принят за 100 %.

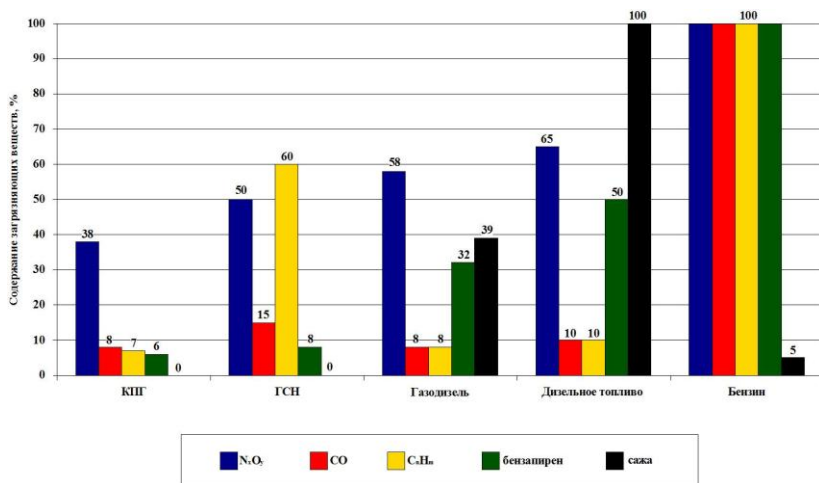


Рис. 1.1. Содержание загрязняющих веществ в отработавших газах ДВС, работающих на различных видах топлива [9]

Загрязнение атмосферы автотранспортными средствами происходит в большей степени отработавшими газами через выпускную систему автомобильного двигателя, а также, в меньшей степени, картерными газами через систему вентиляции картера двигателя.

Химический состав выбросов зависит от вида и качества топлива, технологии производства, способа сжигания в двигателе и его технического состояния.

Перевод бензиновых ДВС на газ, во-первых, даёт снижение количества выбросов: N_xO_y – на 50...62 %; CO – на 85...92 %; C_nH_m – на 40...93 %; бензапирена – на 92...94 %; во-вторых позволяет снизить содержание сажи в отработавших газах до нулевого уровня. Перевод дизельных ДВС на газ (газодизель) даёт более скромные результаты: количество выбросов N_xO_y сокращается всего на 7 %; CO – на 2 %; C_nH_m – на 2 %; бензапирена – на 18 %; сажи – на 61 %. Но дизельный ДВС, по сравнению с бензиновым, уже представляет меньшую экологическую опасность (по N_xO_y – на 35 %; по CO – на 90 %; по C_nH_m – на 90 %; по бензапирену – на 50 %), за исключением сажи (разница составляет 95 % не в пользу дизельного ДВС) [9].

Модифицирование бензина, дизельного топлива и присадки к ним также оказывают влияние на состав отработавших газов ДВС. Например, отказ от этилирования бензинов позволяет избавиться от выбросов свинца и повысить долговечность каталитических нейтрализаторов.

Увеличение цетанового числа дизельного топлива на малых и средних нагрузках способствует уменьшению выброса N_xO_y и C_nH_m , а на больших в некоторых случаях – повышению дымности выхлопа. Увеличение доли лёгких фракций в дизельном топливе приводит к снижению дымности отработавших газов и концентрации в них N_xO_y .

Наряду с конструктивными факторами на состав отработавших газов оказывают влияние и эксплуатационные факторы, к которым относятся условия эксплуатации (режимы движения и природно-климатические факторы) и техническое состояние автомобиля и двигателя.

В определенной степени загрязнение окружающей среды зависит и от возраста автотранспортных средств, находящихся в эксплуатации.

Предприятия автомобильного транспорта.

Загрязнение окружающей среды по «вине» транспорта происходит от производств, обеспечивающих ремонт автотранспортных средств, а также вспомогательные производства, здания и сооружения хозяйственно-бытового назначения (котельные, гостиницы, вокзалы, заправочные станции, топливные склады), места стоянки транспорта.

Процессы технического обслуживания и ремонта подвижного состава требуют энергетических затрат и связаны с большим водопотреблением, выбросом загрязняющих веществ в атмосферу, водоемы и образованием отходов, в том числе токсичных.

Во многих технологических процессах образуются производственные сточные воды. Сточные воды образуются при мойке автомобилей, очистке узлов и агрегатов в моечных машинах, при ремонте аккумуляторных батарей, обработке деталей и т.д.

Стоки воды с производственных территорий транспортных предприятий содержат жидкие нефтепродукты, остатки мою-

щих, дезинфицирующих, антиобледенительных и противогололедных реагентов, формовочных смесей, растворов и т.д. В составе сточных вод содержатся вещества: бензол, ацетон, кислоты, щелочи, растворенные металлы (алюминий, бериллий, хром и др.).

Также от этих источников загрязнения поступают в атмосферу газообразные выбросы в результате работы производственных вентиляционных систем. Состав выбросов включает в себя большое количество минеральной и органической пыли, аэрозоли, масляного тумана.

Ремонтные работы сопровождаются загрязнением почвы, накоплением металлических, пластмассовых и резиновых отходов вблизи производственных участков и отделений.

В таблице 1.3 представлены виды загрязнений, образующиеся в производственных процессах на эксплуатационных и ремонтных предприятиях транспорта.

Таблица 1.3

Источники выделения и состав вредных веществ

Название зоны, участка, отделения	Выделяющиеся вредные вещества
1	2
Участок мойки автомобилей	Пыль, щелочи, поверхностно-активные синтетические вещества, нефтепродукты, растворимые кислоты, фенолы
Зона технического обслуживания, участок диагностирования	Оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, масляный туман, сажа, пыль
Слесарно-механическое отделение	Пыль абразивная, металлическая, стружка, масляный туман, эмульсии
Электротехническое отделение	Абразивная и асбестовая пыль, канифоль, пары кислот
Аккумуляторный участок	Промывочные растворы, пары кислот, электролит, шламы, щелочные аэрозоли
Отделение топливной аппаратуры	Бензин, керосин, дизельное топливо, ацетон, бензол, ветошь

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Меднико-жестяническое отделение	Пары кислот, наждачная и металлическая пыль, отходы
Сварочное отделение	Минеральная пыль, сварочный аэрозоль, оксиды марганца, азота, хрома, хлористый водород, фториды
Арматурное отделение	Пыль, сварочный аэрозоль, древесная и металлическая стружка, металлические и пластмассовые отходы
Участок шиномонтажа и ремонта шин	Минеральная и резиновая пыль, сернистый ангидрид, пары бензина
Участок лакокрасочных покрытий	Пыль минеральная и органическая, пары растворителей и аэрозоли красок
Участок обкатки двигателей	Оксиды углерода, азота, углеводороды, сажа, сернистый ангидрид
Стоянка подвижного состава	То же

Контрольные вопросы к главе 1

1. В чем проявляется негативное влияние автомобильного транспорта на окружающую среду?
2. В чем проявляется опасность загрязнения окружающей среды от автотранспортных средств?
3. Какие загрязняющие вещества попадают в атмосферу от работы автомобильного транспорта?
4. Какие загрязнения возникают в результате производственных процессов на автомобильном транспорте?

ГЛАВА 2. ВИДЫ ТОПЛИВ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Топливо – это горючие вещества, используемые для получения тепловой энергии при их сгорании.

В автомобильных и тракторных двигателях применяют бензин, дизельное и газообразное топливо.

2.1. Бензины

2.1.1. Основные характеристики и требования к бензину

Бензины – лёгкие фракции продуктов переработки нефти, с температурой кипения с $+35^{\circ}\text{C}$ до $+195^{\circ}\text{C}$.

Для фракционного состава бензинов наиболее характерны температуры перегонки 10, 50 и 90% топлива, а также температура начала и конца перегонки и давление насыщенных паров.

Температура начала и температура перегонки 10% топлива наряду с давлением насыщенных паров характеризуют содержание углеводородов, кипящих при низкой температуре. Эти углеводороды обеспечивают возможность получения смеси, обеспечивающей пуск двигателя при низких температурах.

Температура перегонки 50% топлива характеризует содержание углеводородов, определяющих равномерное количественное и качественное распределение горючей смеси. При работе двигателя на бензине с низкой температурой 50% перегонки требуется меньше времени на прогрев двигателя, достигается более равномерное распределение нагрузки по цилиндрам.

Температура перегонки 90% и конца кипения топлива характеризует допустимое содержание в бензине углеводородов, кипящих при высокой температуре. Чем выше эта температура, тем больше в цилиндр попадает топлива в жидкой фазе. Часть его проникает в картер, создавая условия повышенного износа ЦПГ и снижая вязкость масла. Оставшаяся в цилиндре жидкая неиспарившаяся фаза сгорает не полностью, вследствие чего увеличивается дымность и токсичность.

Давление насыщенных паров бензина – (летнего вида – не более $66,7 \text{ кПа}$, зимнего вида – $93,3 \text{ кПа}$) – влияет не только на

пусковые свойства при низкой температуре, но и на работу двигателя в случае нагрева бензина в системе питания. При повышении температуры из бензина испаряются углеводороды с низкой температурой кипения. Эти пары образуют паровоздушные пузырьки в топливе, в результате смесь, поступающая в цилиндры, *обедняется* ($\alpha > 1$) и может выйти за пределы воспламеняемости. А это, в свою очередь, вызывает пропуски зажигания с увеличением вредных выбросов и остановку двигателя.

Групповой химический состав характеризует процентное содержание в топливе углеводородов различных групп, определяющих его физико-химические и эксплуатационные характеристики. Он определяет допустимую степень сжатия ϵ двигателя, при которой происходит нормальное сгорание. При несовпадении ГХС и ϵ нарушается нормальное сгорание – оно становится детонационным с возникновением ударных волн давления в камере сгорания.

Наименее склонны к детонационному сгоранию ароматические и изопарафиновые углеводороды (изоалканы) (*чем более компактна молекула углеводорода, тем выше его детонационная стойкость*), *наиболее склонны* – нормальные парафиновые углеводороды (алканы). Алкены (олефиновые) и цикланы (нафтеновые углеводороды) занимают промежуточное положение.

Соотношение между углеводородами указанных групп в бензинах меняется в широких пределах, соответственно, их детонационная стойкость различна.

Наибольшей детонационной стойкостью обладает изооктан (его стойкость принимается за 100 ед.), *наименьшей* – нормальный гептан (его стойкость равна 0 ед.).

Детонационная стойкость бензина характеризуется *октановым числом (ОЧ)*, т.е. процентным содержанием (по объёму) изооктана в смеси с нормальным гептаном, которая по детонационной стойкости равноценна данному топливу.

Чем выше *ОЧ* топлива, тем выше максимально допустимая степень сжатия, при которой топливо будет сгорать без детонации.

Октановое число определяется двумя методами:

– *моторным (ОЧМ)*;

– *исследовательским (ОЧИ).*

ОЧМ характеризует *детонационную стойкость* бензина при исследовании его в двигателях, *длительно работающих на номинальных нагрузочных и тепловых режимах.*

ОЧИ характеризует *детонационную стойкость* бензина при использовании их в двигателях, *работающих в условиях неустановившихся режимов.*

ОЧИ выше, чем ОЧМ.

Разность этих чисел – *чувствительность бензина* – дополнительный показатель детонационной стойкости при различных режимах работы двигателя.

Чем выше *чувствительность бензина*, тем лучше его детонационная стойкость при работе двигателя на неустановившихся режимах.

Чувствительность бензина зависит от ГХС.

Наибольшей чувствительностью обладают ароматические и олефиновые углеводороды, *наименьшей* – парафиновые. Нафтовые имеют средние значения чувствительности.

Основные требования к топливам (бензинам) для двигателей с принудительным воспламенением:

- обеспечение простого способа образования гомогенной (однородной) топливовоздушной смеси;
- обеспечение бездетонационного сгорания топливовоздушной смеси на различных режимах работы двигателя;
- отсутствие в составе соединений, которые могут подвергаться быстрым химическим изменениям, т.е. обеспечение постоянных физико-химических свойств бензина при хранении и транспортировке;
- отсутствие в составе соединений, которые могут способствовать образованию смол, нагаров или осадков в процессе работы двигателя;
- отсутствие компонентов, вызывающих коррозию деталей двигателя;
- низкая температура застывания;
- отсутствие антидетонационных присадок на базе *Pb*.

2.1.2. Ассортимент бензинов

В зависимости от октанового числа устанавливаются следующие марки автомобильных бензинов:

A-72 – с октановым числом по моторному методу не менее 72;

A-76 – с октановым числом по моторному методу не менее 76;

АИ-91 – с октановым числом по исследовательскому методу не менее 91;

АИ-93 – с октановым числом по исследовательскому методу не менее 93;

АИ-95 – с октановым числом по исследовательскому методу не менее 95.

Автомобильные бензины подразделяют на виды:

летний – для применения во всех районах, кроме северных и северо-восточных, в период с 1 апреля до 1 октября; в южных районах допускается применять летний вид бензина в течение всех сезонов;

зимний – для применения в течение всех сезонов в северных и северо-восточных районах и остальных районах с 1 октября до 1 апреля.

Наиболее массовые отечественные бензины *A-76*, *АИ-93* и *АИ-92* выпускаются в соответствии с требованиями ГОСТ 2084-77 «Бензины автомобильные» и ТУ 38.001165-97.

Основные показатели бензинов, выпускаемых по ГОСТ 2084-77, представлены в табл. 2.1

Таблица 2.1

Основные показатели бензинов, выпускаемых по ГОСТ 2084-77

Наименование показателя	Значение для марки					
	A-72	A-76		АИ-91	АИ-93	АИ-95
	неэтили- роvan- ный	неэтили- роvan- ный	этили- роvan- ный	неэтили- роvan- ный	неэтили- роvan- ный	неэтили- роvan- ный
1	2	3	4	5	6	7
1. Детонационная стой- кость: октановое число, не менее; по моторному методу	72	76	76	82,5	85	85

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7
по исследовательскому методу	Не нормируется			91	93	95
2. Массовая концентрация свинца, г, на 1 дм ³ бензина, не более	0,013	0,013	,17	0,013	0,013	0,013
3. Фракционный состав: температура начала перегонки бензина, °С, не ниже:						
летнего	35	35	35	35	35	30
зимнего	Не нормируется		-		Не нормируется	
10 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:						
летнего	70	70	70	70	70	75
зимнего	55	55	55	55	55	55
50 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:						
летнего	115	115	115	115	115	120
зимнего	100	100	100	100	100	105
90 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:						
летнего	180	180	180	180	180	180
зимнего	160	160	160	160	160	160
конец кипения бензина, °С, не выше:						
летнего	195	195	195	205	205	205
зимнего	185	185	185	195	195	195
остаток в колбе, %, не более	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
остаток и потери, %, не более	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
4. Давление насыщенных паров бензина, кПа (мм рт. ст.), не более:						
летнего	66,7 (500)	66,7 (500)	66, (500)	66,7 (500)	66,7 (500)	66,7 (500)
зимнего	66,7 - 93,3 (500 - 700)	66,7 - 93,3 (500 - 700)	66,7- 93,3 (500- 700)	66,7 - 93,3 (500 - 700)	66,7 - 93,3 (500 - 700)	66,7 - 93,3 (500 - 700)

Продолжение табл. 2.1.

1	2	3	4	5	6	7
5. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ бензина, не более	3,0	1,0	3,0	3,0	0,8	2,0
6. Концентрация фактических смол в мг на 100 см ³ бензина, не более:						
на месте производства	5,0					
на месте потребления	10,0					
7. Индукционный период бензина на месте производства, мин, не менее	600	1200	900	900	1200	900
8. Массовая доля серы, %, не более	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
9. Испытание на медной пластине	Выдерживает					
10. Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие					
11. Механические примеси и вода						
12. Цвет	-	-	Желтый	-	-	-
13. Плотность при 20 °С, кг/м ³	Не нормируется. Определение обязательно					

ГОСТ Р 51105-97 «Бензины для автомобильного транспорта», введенный в 1999 г., предусматривает выпуск и классификацию автомобильных бензинов в соответствии с их испаряемостью и октановым числом, определяемым исследовательским методом.

В зависимости от октанового числа, определенного исследовательским методом, устанавливаются следующие марки неэтилированных автомобильных бензинов:

- Нормаль-80 - не менее 80;
- Регуляр-91 - не менее 91;
- Регуляр-92 - не менее 92;
- Премиум-95 - не менее 95;
- Супер-98 - не менее 98.

Бензин «Нормаль-80» используется для грузовых автомобилей вместо бензина А-76, а «Регуляр-91» вырабатывается взамен бензина АИ-93.

Бензины «Премиум-95» и «Супер-98» предназначены в основном для автомобилей иностранного производства и отвечают европейским стандартам.

В зависимости от климатического района применения по ГОСТ 16350 автомобильные бензины подразделяют на пять классов:

- 1 - для района П9 с 1 апреля по 1 октября;
- 2 - для районов П4 и П5 с 1 апреля по 1 октября;
- 3 - для районов П1 и П2 с 1 апреля по 1 октября и для района П9 с 1 октября по 1 апреля;
- 4 - для районов П4 и П5 с 1 октября по 1 апреля;
- 5 - для районов П1 и П2 с 1 октября по 1 апреля.

По ТУ 38.001165-97 выпускаются бензины *A-80* и *A-96* с октановыми числами по исследовательскому методу соответственно *80* и *96*. Эти бензины предназначены для поставки на экспорт.

Автомобильный бензин *АИ-98* с октановым числом *98* по исследовательскому методу выпускается по ТУ 38.401 -58-122-95 и ТУ 38.401-58-127-95.

По ТУ 38.401 -58-86-94 производится малоэтилированный бензин *АИ-91*.

Всесезонные бензины, вырабатываемые на экспорт, и бензин *АИ-98* производятся по ТУ 38.001165-97.

Выпуск бензинов с улучшенными экологическими показателями производится по ТУ 38.401-58-171-96, а бензинов марки «ЯрМарка» — по ТУ 38.301-25-41-97.

В связи с широким распространением автомобилей, оснащенных системами электронного управления впрыском бензина (в том числе непосредственного), все чаще стали применяться бензины с повышенной до $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурой конца кипения.

Основные характеристики автомобильных бензинов с улучшенными экологическими показателями, выпускаемые в соответствии с требованиями ТУ 38.401.58-171-96, представлены табл. 2.2.

Таблица 2.2

Основные характеристики автомобильных бензинов с улучшенными экологическими показателями

Наименование показателя	ТУ 38.401.58-171-96			
	АИ-80ЭК	АИ-92ЭК	АИ-95ЭК	АИ-98ЭК
Октановое число, не менее по методу моторному исследовательскому	76 80	83 92	85 95	88 98
Содержание свинца г/дм ³ , не более	0,010	0,010	0,010	0,010
Фракционный состав: объем испарившегося бензина %, при температуре:				
70 °С	10 - 50	15 - 50	15 - 50	15 - 50
100 °С	35 - 70	40 - 70	40 - 70	40 - 70
180 °С	85	85	85	85
Конец кипения бензина, при температуре, °С, не выше	215	215	215	215
Доля остатка в колбе, % (по объему), не более	2,0	2,0	2,0	2,0
Давление насыщенных паров бензина, кПа : летний период зимний период	35 - 70 -	35 - 70 -	35 - 70 -	35 - 70 -
Индекс паровой пробки, не более летний период зимний период	950 1250	950 1250	950 1250	950 1250
Содержание фактических смол на месте производства, мг/см ³ , не более	5,0	5,0	5,0	5,0
Объемная доля, %, не более ароматических углеводородов, в том числе бензола	- 3	- 3	- 5	- 5
Индукционный период на месте производства, мин, не менее	360	360	360	360
Массовая доля серы, %, не более	0,05	0,05	0,05	0,05
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	780	780	780	780

В соответствии с ГОСТ Р 51105-97 «Бензины для автомобильного транспорта» в России предусмотрен выпуск бензинов, удовлетворяющих экологическим требованиям европейских норм EN 228.

В табл. 2.3 приведены действующие и перспективные отечественные и зарубежные требования по ряду экологических показателей бензинов.

Таблица 2.3

Действующие и перспективные отечественные и зарубежные требования по экологическим показателям бензинов

Наименование показателя	Нормы экологических показателей						
	Отечественные				Зарубежные		
	Действующие		Вводимые		Действ. Нормы по EN228	Перспективные	
	А-76 АИ-93 АИ-98	АИ-92	АИ-80ЭЖ	АИ-92ЭЖ		Предл. комис. ЕС	Предл. АЕАК
Содержание свинца, г/дм ³	0,15	0,013	0,01	0,01	0,013	0,005	-
Массовая доля серы, %, не более	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,003
Объемная доля бензола, %, не более	-	-	3	5	5	2	1
Объемная доля аром. соед., %, не более	-	-	-	-	-	45	35
Давл. насыщ. паров, кПа	66,7	80	70	70	65	60	60

Наиболее массовые отечественные бензины *А-76*, *АИ-93* (ГОСТ 2084-77) и *АИ-92* (ТУ 38.001165-97) не отвечают указанным требованиям по содержанию свинца (для этилированных бензинов), массовой доли серы, отсутствию регламентации содержания бензола и моющих присадок.

2.1.3. Экология бензинов

Продукты сгорания моторных топлив являются одним из основных загрязнителей воздушного бассейна. По мере увеличения потребления топлив возрастает содержание в воздухе таких наиболее токсичных составляющих отработавших газов двигателей, как *соединения свинца*, оксиды азота, монооксид углерода, несгоревшие ароматические углеводороды, особенно *бензол*. Опасны также твердые продукты неполного сгорания топлив — *сажа*. Вредное воздействие сажи на человека связано с адсорбцией ее частицами многих продуктов сгорания, стимулирующих образование злокачественных опухолей.

При сгорании бензинов наиболее агрессивными в составе отработавших газов являются соединения свинца, бенз(а)пирена

и окислы азота. Большую угрозу для здоровья человека представляют и пары бензинов, содержание которых в атмосфере с увеличением объема производства нефтяных продуктов также возрастает. Таким образом, токсичность отработавших газов и паров моторных топлив зависит от их углеводородного состава и наличия различных добавок. Добиться улучшения качества бензинов с целью повышения экологической безопасности их применения можно путем оптимизации углеводородного и химического составов топлив. Ориентирами при разработке и внедрении бензинов с улучшенными экологическими показателями являются нормы европейских стандартов на бензины *EN 228*, а также фактические показатели качества европейских топлив, которые, как правило, выше норм, регламентируемых международными стандартами.

Повысить качество автомобильных бензинов можно за счет следующих мероприятий:

- отказа от применения в составе бензинов соединений свинца (что уже сделано);
- снижения содержания в бензине серы до 0,05%, а в перспективе до 0,003%;
- снижения содержания в бензине ароматических углеводородов до 45%, а в перспективе до 35%;
- нормирования концентрации фактических смол в бензинах на месте применения на уровне не более 5 мг на 100 см³;
- деления бензинов по фракционному составу и давлению насыщенных паров на 8 классов с учетом сезона эксплуатации автомобилей и температуры окружающей среды, характерной для конкретной климатической зоны;
- наличие классов позволяет выпускать бензин со свойствами, оптимальными для реальных температур окружающего воздуха, что обеспечивает работу двигателей без образования паровых пробок при температурах воздуха до +60⁰С, а также гарантирует высокую испаряемость бензинов и легкий пуск двигателя при температурах ниже -35⁰С;
- введения моющих присадок, не допускающих загрязнения и осмоления деталей топливной аппаратуры.

Суммарное снижение агрессивности за счет всех мероприятий по повышению качества бензинов составляет 12%, в то время как увеличение затрат на производство бензинов с улучшенными экологическими показателями относительно невелико и не превышает 5...8% себестоимости изготовления бензина.

Основные показатели качества автомобильных бензинов, их испаряемость и фракционный состав приведены в табл. 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Физико-химические и эксплуатационные показатели автомобильных бензинов

Наименование показателя	Значение для марки				
	Нормаль-80	Регуляр-91	Регуляр-92	Премиум-95	Супер-98
1 Октановое число, не менее:					
по моторному методу	76,0	82,5	83,0	85,0	88,0
по исследовательскому методу	80,0	91,0	92,0	95,0	98,0
2 Концентрация свинца, г/дм ³ , не более	Отсутствие				
3 Концентрация марганца, мг/дм ³ , не более	Отсутствие				
4 Концентрация фактических смол, мг на 100 см ³ бензина, не более	5,0				
5 Индукционный период бензина, мин, не менее	360				
6 Массовая доля серы, %, не более	0,05				
7 Объемная доля бензола, %, не более	5				
8 Испытание на медной пластине	Выдерживает класс I				
9 Внешний вид	Чистый Прозрачный				
10 Плотность при 15°C, кг/м ³	700-750	725-780	725-780	725-780	725-780
11. Концентрация железа, г/дм ³ , не более	Отсутствие				

Характеристики испаряемости приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Испаряемость бензинов

Наименование показателя	Значение для класса				
	1	2	3	4	5
1 Давление насыщенных паров бензина, кПа, ДНП					
мин.	35	45	55	60	80
макс.	70	80	90	95	100
2 Фракционный состав:					
температура начала перегонки, °С, не ниже	35	35	Не нормируется		
пределы перегонки, °С, не выше:					
10 %	75	70	65	60	55
50 %	120	115	110	105	100
90 %	190	185	180	170	160
конец кипения, °С, не выше	215				
доля остатка в колбе, %, (по объему)	2				
остаток и потери, % (по объему) или объем испарившегося бензина, %, при температуре:	4				
70°С мин.	10	15	15	15	15
макс.	45	45	47	50	50
100°С мин.	35	40	40	40	40
макс.	65	70	70	70	70
180°С, не менее	85	85	85	85	85
конец кипения, °С, не выше	215				
остаток в колбе, % (по объему), не более	2				
3 Индекс испаряемости, не более	900	1000	1100	1200	1300

Зачастую требования региональных органов управления к качеству автомобильных топлив (в частности г. Москвы) бывают жестче, чем европейские (ГОСТ Р 51105-97 (Евро II), ГОСТ Р 51866-2002 (Евро III)), как показано в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Требования к качеству автомобильных топлив

Требования к бензинам	ГОСТ Р 51105-97 (Евро II)	Московские стандарты	ГОСТ Р 51866-2002 (Евро III)	Бензин «Экто»
Содержание серы, ppm, не более	500	150	150	5
Предельное содержание бензола, % объёма	5	1 (с 01.01.2007)	1	1
Предельное содержание ароматики, % объёма	Не нормируется	42	42	31-41
Предельное содержание олефинов, % объёма	Не нормируется	18	21/18	1

Законодательством США приняты поправки к закону о чистом воздухе, которые в связи с изменениями экологических требований к топливам после запрета свинцовых антидетонаторов предусматривают переход на использование реформулированных бензинов. В соответствии с принятыми поправками выдвинуты более жесткие требования к бензинам по следующим показателям: давлению насыщенных паров, фракционному составу, содержанию ароматических углеводородов, бензола, олефинов, серы. Предусмотрено обязательное добавление в реформулированные бензины кислородосодержащих соединений (не менее 0,8% по кислороду) и моющих присадок.

Рекомендации по применению автомобильных бензинов.

Октановое число бензина, его основная характеристика, нормируемая по ГОСТ, определяется моторным или исследовательским методами. Бензин, имеющий в обозначении его марки букву «И» и цифру (например, *АИ-95*), соответствует октановому числу, определенному исследовательским методом. *ОЧ* бензина, определенное исследовательским методом, на 4-10 единиц выше, чем *ОЧ*, определенное моторным методом.

Несоответствие марки (октанового числа) бензина параметрам двигателя может вызвать детонационное сгорание топливной смеси, сопровождаемое характерным металлическим стуком, повышением дымности отработавших газов и температуры в цилиндрах двигателя.

$$ЦЧ = (55 \pm 5) - 0,45 \cdot ОЧМ ;$$

$$ЦЧ = (60 \pm 5) - 0,5 \cdot ОЧИ .$$

2.2. Дизельные топлива

2.2.1. Основные характеристики и требования к дизельному топливу

Дизельное топливо – фракции продуктов переработки нефти, выкипающие при температурах до 390°C.

Фракционный состав дизельных топлив определяется теми же характерными температурами перегонки фракций, что и бензины: 10, 50, 96%

Температура перегонки 10% топлива характеризует содержание углеводородов, легко испаряющихся в цилиндре двигателя. Чрезмерное содержание легкоиспаряющихся углеводородов увеличивает испарение топлива и массы подготовленной к воспламенению смеси, что увеличивает жесткость процесса, работа двигателя сопровождается шумом, вибрациями, интенсивным износом.

Температура перегонки 50% топлива характеризует равномерность распределения углеводородов, полностью испарившихся в процессе смесеобразования.

Температура перегонки 96% топлива характеризует наличие в топливе трудно испаряющихся углеводородов.

Основные требования к дизельному топливу:

- обеспечение процесса смесеобразования в соответствии с выбранным рабочим процессом;
- обеспечение нормального сгорания в соответствии с рабочим процессом;
- стабильность физико-химических характеристик;

- отсутствие компонентов, способствующих образованию нагаров, смол и осадков;
- отсутствие компонентов, вызывающих коррозию деталей;
- низкая температура застывания.

Процесс смесеобразования в дизелях в значительной степени определяет протекание рабочего процесса в целом. Большое влияние на протекание смесеобразования оказывают вязкость и фракционный состав дизельного топлива. Отклонение вязкости дизельного топлива вызывает изменение цикловой подачи и фаз впрыскивания (начала, продолжительности и конца впрыскивания топлива).

Плотность топлива заметно влияет на характер топливоподачи в дизеле. Например, при переходе с дизельного топлива на бензин для сохранения мощности двигателя неизменной необходимо увеличить продолжительность впрыска топлива. Это, в свою очередь, повышает содержание сажи в отработавших газах. Улучшение испаряемости топлива при переходе на бензин не компенсирует ухудшения процесса сгорания из-за увеличения продолжительности впрыска топлива, но уменьшает концентрацию NO_x в отработавших газах.

При работе двигателя на дизельном топливе и керосине разница в концентрации NO_x в отработавших газах незначительна.

При *увеличении вязкости* повышается расход топлива (уменьшаются утечки топлива в ходе нагнетания). Одновременно возрастает угол опережения впрыскивания топлива $\theta_{впр}$. Кроме того, ухудшается качество распыливания топлива, увеличивается неоднородность размеров и средний диаметр капель, а также глубина проникновения факела в воздушный заряд, угол конуса факела уменьшается.

Особенно чувствительны к изменению вязкости топлива дизели с неразделенными камерами сгорания, форма и размеры которых согласованы с распределением топливных факелов.

Чрезмерное содержание трудно испаряющихся углеводородов приводит к неполному испарению капель топлива и неполноте сгорания, при этом ухудшаются мощностные и экономиче-

ские показатели дизеля, увеличивается дымность и токсичность ОГ, увеличивается отложение нагара в камере сгорания.

Основная характеристика дизельного топлива – *склонность к воспламенению*. От неё зависит период задержки воспламенения. Топлива с большей склонностью к воспламенению обеспечивают более благоприятное протекание процесса сгорания.

Воспламеняемость дизельных топлив зависит от группового химического состава.

Наибольшей склонностью к воспламенению обладают углеводороды нормального парафинового ряда (воспламеняемость цетана - $C_{16}H_{34}$ принимается за 100 ед.), *наименьшей* – углеводороды ароматического ряда (воспламеняемость α -метилнафталина – 0 ед.). Нафтеновые углеводороды – занимают промежуточное положение.

Склонность к воспламенению дизельных топлив оценивается *цетановым числом (ЦЧ)*, т.е. процентным по объёму содержанием *цетана* в смеси с α -метилнафталином, которая имеет такую же склонность к воспламенению, что и данное топливо.

При недостаточном ЦЧ возрастает период задержки воспламенения, что может вызвать повышенные скорости нарастания давления в цилиндре и шумы при работе двигателя.

При увеличенном ЦЧ уменьшается период задержки воспламенения, воспламенение топлива происходит до распределения капель в воздушном заряде, что приводит к росту неполноты сгорания, ухудшению мощностных и динамических характеристик и увеличению дымности и токсичности ОГ.

В связи с этим *цетановое число (ЦЧ)* дизельных топлив составляет 40÷55 ед.

Возможность применения дизельных топлив в различных климатических условиях характеризуется температурой кристаллизации, при которой выпадающие из топлива кристаллы растворённых парафиновых углеводородов, имеющих высокую температуру кипения, затрудняют его подачу из бака через фильтры к форсункам.

2.2.2. Ассортимент дизельных топлив

В соответствии с ГОСТ 305-2013 в зависимости от условий применения выпускаются следующие марки дизельного топлива:

- *Л* летнее, рекомендуемое для эксплуатации при температуре окружающего воздуха минус 5°С и выше;
- *Е* межсезонное, рекомендуемое для эксплуатации при температуре окружающего воздуха минус 15°С и выше;
- *З* зимнее, рекомендуемое для эксплуатации при температуре окружающего воздуха до минус 25 °С (предельная температура фильтруемости - не выше минус 25 °С) и до минус 35 °С (предельная температура фильтруемости - не выше минус 35 °С);
- *А* арктическое, рекомендуемое для эксплуатации при температуре окружающего воздуха минус 45 °С и выше. Температура застывания арктического дизельного топлива не превышает –55°С. Оно предназначено для дизелей, работающих в суровых условиях Севера и Сибири при температуре воздуха –50°С и выше.

Эти топлива предназначены для использования на всех моделях быстроходных дизельных и газотурбинных двигателей наземной и судовой техники. Каждая марка топлива делится на две подгруппы: с содержанием серы, не более:

- 0,2% – для всех марок первой подгруппы;
- 0,4% – для марки *А*;
- 0,5% – для марки *Л* и *З* второй подгруппы.

При обозначении дизельного топлива указываются:

- для марки *Л* температуру вспышки и экологический класс топлива;
- для марок *Е* и *З* предельную температуру фильтруемости и экологический класс топлива;
- для марки *А* - экологический класс топлива.

Также к марке дизельного топлива добавляются цифры. Для *летнего* топлива добавляются цифры, обозначающие содержание в нем серы и температуру вспышки. В условное обозначение *зимнего* топлива входят марка и цифры, соответствующие

массовой доле серы и температуре застывания. При обозначении *арктического* топлива к его марке добавляется только цифра, указывающая содержание серы.

В связи с ростом парка дизельных автомобилей увеличивается потребность в дизельном топливе, поэтому стоит вопрос о ресурсах для его производства. Существенное расширение ресурсов дизельного топлива может быть достигнуто, прежде всего, за счет углубления его отбора от нефти с повышением конца кипения на 25...30°C. Такое топливо получило название дизельного топлива *утяжеленного фракционного состава (УФС)*.

Оно предназначено для обеспечения эксплуатации автотракторной техники в летний период и отличается от топлива ДЛ главным образом более высокими температурами застывания и помутнения. Из-за наличия тяжелых фракций при использовании топлива УФС наблюдается некоторое увеличение его расхода (на 2...3%), повышение нагарообразования и снижение ресурса работы фильтрующих элементов.

Вторым направлением увеличения ресурсов дизельных топлив является добавление легких бензиновых фракций.

Такие топлива называются топливами *широкого фракционного состава (ШФС)*.

Бензин может добавляться и в утяжеленное дизельное топливо, в этом случае оно получило название топлива *расширенного фракционного состава (РФС)*.

Топливо *РФС* содержит до 10 % бензиновых фракций прямой перегонки и вторичных процессов. Фракционный состав топлива *РФС* по температуре выкипания 50 и 90 % аналогичен топливу *УФС*, однако в этом случае из-за наличия бензиновых фракций дополнительно лимитируется 10 % точка перегонки.

Основные требования к дизельным топливам приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Требования к дизельному топливу

Показатель	ГОСТ 305-2013				ТУ 38.001. 355-86	ТУ 38.401. 652-87
	Л	Е	З	А	УФС	РФС
1	2	3	4	5	6	7
Цетановое число, не менее	45	45	45	45	45	45
Фракционный состав: 50% перегоняется при температуре, °С, не выше	280	280	280	255	290	280
95% (по объему) перегоняется при температуре, °С, не выше	360	360	360	360	До 360 °С перегоняется не менее 90 %	
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,0...6	3,0...6	1,8...5	1,5...4	3...6,5	3...6
Температура застывания для климатической зоны, °С, не выше: умеренной холодной	-10 -	-15 -	-35 -45	- -55	0 -	-5 -
Температура вспышки (в закрытом тигле), °С, не ниже: для дизелей общего назначения для тепловозных и судовых дизелей, газовых турбин	40 62	40 62	30 40	30 35	40 61	20 -
Массовая доля серы, мг/кг, не более	2000					
Содержание меркаптановой серы, %, не более	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Массовая доля сероводорода	Отсутствие					
Кислотность, мг КОН/100 см ³ , не более	5	5	5	5	5	50
Йодное число, г/100 см ³ , не более	6	6	6	6	6	6
Зольность, %, не более	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Продолжение таблицы 2.7

1	2	3	4	5	6	7
Коксуемость 10 %-ного остатка, %, не более	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Коэффициент фильтруемости, не более	3	3	3		3	3
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	863,4	863,4	843,4	833,5	860	860

В Европе технические условия на дизельное топливо определяются национальными стандартами и общеевропейским стандартом EN 590 (табл. 2.8).

Таблица 2.8

**Основные характеристики дизельных топлив
по Европейскому стандарту EN 590**

Параметр	Размерность	Величина
Температура воспламенения, min	°С	55
Содержание воды, max	мг/кг	200
Содержание серы, max	в % по весу	0,05
Для умеренного климата		
Плотность при температуре 15°С, min/max	кг/м ³	820/860
Вязкость при температуре 40°С, min/max	мм ² /с	2/4,5
Цетановое число, min	-	49
Дизельный индекс, min:	-	46
при температуре до 250 °С, max	в % по объему	65
при температуре до 350 °С, min	в % по объему	85
при температуре до 370 °С, min	в % по объему	95
Предел фильтрации в шести классах А...F, max	°С	+5...-20
Для арктического климата (в пяти классах 0...4)		
Плотность при температуре 15°С, min/max	кг/м ³	800/845...800/840
Вязкость при температуре 40°С, min/max	мм ² /с	1,5/4...1,2/4
Цетановое число, min	-	47...45
Дизельный индекс, min:	-	
при температуре до 180 °С, max	в % по объему	46...43
при температуре до 340 °С, min	в % по объему	10
		95
Предел фильтрации, max	°С	-20...-44

В настоящее время в соответствии с EN 590 Мозырским НПЗ разработаны ТУ 38.401-58-296-2001, которые предусматривают выпуск трех сортов дизельного топлива.

Для улучшения смазывающего эффекта в состав топлива вводят смазывающие присадки.

Основные показатели качества, характеризующие дизельное топливо, представлены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Основные характеристики дизельных топлив по ТУ 38.401-58-296-2001

Параметр	Размерность	Величина
Температура вспышки, min	°С	55
Полициклические ароматические углеводороды	в % по массе	11
Содержание серы, max:	мг/кг	
II вида		50
I вида		10
Плотность при температуре 15 °С, min/max	кг/м ³	820/845
Цетановое число, min	-	51
Цетановый индекс, min	-	46
Фракционный состав:	в % по объему	
при температуре до 250 °С, max		65
при температуре до 350 °С, min		85
при температуре до 360 °С, max		95
Предел фильтрации, max:	°С	
сорт А		+5
сорт В		0
сорт С		-5

В настоящее время в связи с ужесточением норм на экологические показатели работы дизельных двигателей в России введены ТУ на выпускаемые дизельные топлива, которые предназначены на экспорт и для использования в современных дизельных автомобилях. Такие дизельные топлива имеют обозначения ДИТО–ЭЛ, ДИТО–ЭЗ. Дизельные экологически чистые топлива (ДЭ) имеют более высокое цетановое число и меньшее содержание серы. Например, у ДИТО–ЭЛ цетановое число – 49 (у ДЛ – 45), содержание серы 0,05% (против 0,2 % у ДЛ).

2.3. Газообразное топливо

Газообразное топливо – механическая смесь горючих и инертных газов.

В качестве газообразного топлива в ДВС применяются природные газы, попутные газы, газы, выделяющиеся при добыче и переработке нефти, попутные промышленные и канализационные газы, а также газы, полученные из твердого топлива путём его газификации.

Наибольшее применение в качестве топлива получили природные газы и сопутствующие газы.

Основным компонентом природных газов является метан CH_4 – до 98%. Нефтяные попутные газы состоят главным образом из пропана и бутана. Газообразное топливо обладает такими же эксплуатационными свойствами, что и бензины. По сравнению с бензином процесс образования горючей смеси из газа и воздуха более совершенен (оба компонента находятся в одном агрегатном состоянии). Это обеспечивает более полное сгорание газозооушной смеси (смесь гомогенная) и меньшее в 3÷5 раз содержание токсичных веществ в ОГ, а также уменьшение нагара.

Газообразные топлива имеют высокую детонационную стойкость (*ОЧМ 80÷110*), что позволяет использовать их в двигателях с более высокой степенью сжатия. Поэтому, мощностные показатели у двигателей, работающих на газовом топливе, могут быть выше, чем у бензиновых двигателей.

Газообразное топливо имеет более низкую объёмную теплоту сгорания, чем жидкое нефтяное топливо. В связи с этим, на транспортных установках с газовыми двигателями необходимый запас топлива хранят в сжатом или сжиженном состоянии.

Газообразное топливо используют в двигателях с принудительным зажиганием и в дизелях при газожидкостном цикле или при непосредственном впрыскивании сжиженного газа в цилиндр и воспламенением от сжатия.

Сжатый природный газ получил широкое применение на автомобильном транспорте, сжиженный природный газ – в мощных судовых дизелях.

2.3.1. Сжиженные газы

Применение сжиженного нефтяного газа представляет особый интерес в связи с уменьшением загрязнения атмосферы.

Сжиженный природный газ (*СжПГ*) является криогенной жидкостью, так как при атмосферном давлении температура его кипения составляет около -160°C . Его применение в качестве топлива для автомобилей приводит к усложнению конструкции системы хранения и питания по сравнению с системами хранения и питания для сжиженного нефтяного и сжатого природного газов.

Кроме того, контакты человека с этим топливом или металлическим сосудом, в котором оно находится, могут приводить к сильным обморожениям. Для обнаружения утечек газа необходимо устанавливать специальные детекторы, так как добавление в газ пахучего вещества невозможно.

При нормальном атмосферном давлении и температуре выше 0°C сжиженные нефтяные газы (*СНГ*) находятся в газообразном состоянии, но при сравнительно небольшом повышении давления (при 20°C и давлении для бутана – $0,103\text{МПа}$, пропана – $0,716\text{МПа}$) они переходят в легкоиспаряющуюся жидкость. Поэтому для обеспечения сохранения жидкого состояния при более высоких температурах (до $45\dots 50^{\circ}\text{C}$) для сжиженного газа применяются достаточно легкие баллоны и несложная газовая аппаратура, рассчитанные на рабочее давление $1,6\text{МПа}$, которые практически не снижают грузоподъемность автомобиля.

По отношению к бензину пропан и бутан имеют более высокую массовую теплоту сгорания и характеризуются высокой детонационной стойкостью, в связи с чем эти газы являются хорошим топливом для двигателей внутреннего сгорания с принудительным (искровым) воспламенением.

Кроме того, данное топливо является очень летучим и температура его горения в два раза выше, чем у бензина.

Углеводородные сжиженные топливные газы должны отвечать требованиям ГОСТ 27578-87.

Марка сжиженного газа *ПА* (пропан автомобильный) применяется при температуре окружающего воздуха ($-20\dots -35^{\circ}\text{C}$). Допускается применение этого газа при температуре не выше

+10 °С. Марка ПБА (пропан-бутан автомобильный) применяется при температуре окружающего воздуха не ниже –20 °С. Стандартом предусмотрено полное отсутствие содержания в сжиженном газе свободной воды и щелочи.

Основные показатели сжиженного углеводородного газа для автомобильного транспорта приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Основные требования к сжиженным газам

Показатель качества	Нормы по маркам	
	ПА	ПБА
Массовая доля компонентов, %: сумма метана, этана пропан углеводородов C ₄ и выше непредельных углеводородов, не выше	Не нормируется	
	90±10	50±10
	Не нормируется	
	6	6
Объемная доля жидкого остатка при +40 °С, %, не более	Отсутствует	
Давление насыщенных паров, избыточное, МПа при температуре: +45 °С, не ниже –25 °С, не ниже –35 °С, не ниже	-	1,6
	-	0,07
	0,07	-
Массовая доля серы и сернистых соединений, %, не выше в том числе сероводорода, не выше	0,01	0,01
	0,003	0,003
<i>Примечание</i> – При массовой доле меркаптановой серы менее 0,001 % сжиженные газы должны быть одорированы.		

Пропан-бутановые смеси характеризуются высоким коэффициентом объемного расширения: при увеличении температуры на 10 °С давление в газовом баллоне повышается на 0,6...0,7 МПа. Поэтому во избежание разрушения топливного баллона при повышении температуры в нем необходимо иметь паровую подушку с минимальным объемом не менее 10% от всего объема, т.е. заполнение баллона осуществляется на 90%. Особенностью компонентов сжиженного газа является также отсутствие запаха. Поэтому для обнаружения утечек смеси в нее добавляют специальные продукты – *одоранты*, обладающие специфическим сильным запахом. В качестве одоранта используется обычно этилмеркаптан C₂H₅SH, добавляемый в количестве

0,2...0,3 г на 1000 м³ газа. Запах должен ощущаться при содержании газа в воздухе 0,5 % по объему и более.

Практический опыт эксплуатации газобаллонных автомобилей показал ряд их преимуществ. Отсутствие жидкой фазы (фракций углеводородов) в топливно-воздушной смеси обеспечивает большую равномерность ее распределения по цилиндрам двигателя, исключает смывание смазки с их зеркал, а также значительно снижаются нагарообразование и загрязнение масла. Благодаря этому ресурс работы двигателя и его межремонтный пробег возрастают в 1,5...2, а сроки смены моторного масла – в 2...2,5 раза. При этом из-за сложности газобаллонной системы питания трудоемкость ее технического обслуживания и ремонта возрастает на 3...5 %, что, тем не менее, полностью компенсируется за счет увеличения межремонтного пробега. Кроме того, газовое топливо более дешевое в сравнении с бензином, особенно это актуально для автомобилей с большим объемом двигателя.

Из-за худших пусковых свойств *СНГ* надежный пуск холодного двигателя даже на зимней марке топлива возможен при температуре окружающего воздуха до $-5...-7$ °С. При более низких температурах в условиях безгаражного хранения для запуска двигателя требуется его тепловая подготовка.

При работе на сжиженных газах необходимо соблюдать предосторожности во избежание пожара, так как пары сжиженных газов могут сгорать в различных соотношениях в смеси с воздухом. При недостаточной герметичности могут легко скапливаться под капотом двигателя, снизу автомобиля, а также в закрытых помещениях. При появлении в этих местах открытого огня или искры может произойти взрыв.

Поэтому газовое оборудование требует постоянного внимания и контроля. Рекомендуется для обнаружения его утечки или разлива использовать детекторы.

В зарубежных странах в качестве моторного топлива используют различные составы смеси пропан-бутанового газа, включая практически чистый пропан (США) и бутан (Швеция, Великобритания).

Регулировочная характеристика по составу смеси при работе двигателя на сжиженном газе и бензине представлена на рис. 2.1.

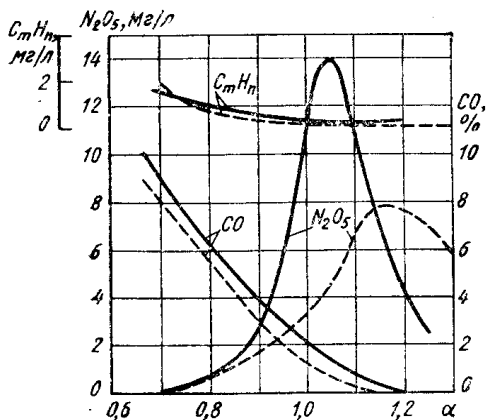


Рис. 2.1. Регулировочная характеристика по составу смеси: (полный дроссель, $n=2000$ мин⁻¹; сплошные линии – работа на бензине, штриховые – на газе)

Сравнительная оценка токсичности V-образного восьмицилиндрового двигателя при работе на сжиженном газе и бензине показывает (рис. 2.1), что максимальная концентрация NO_x уменьшается в случае использования сжиженного газа примерно в 2 раза. Несколько понижается выброс окиси углерода и углеводородов. Максимум NO_x смещается в сторону более бедных смесей. Существенно уменьшается также содержание бенз(а)пирена. Состав углеводородов, содержащихся в отработавших газах, при работе двигателя на бензине и сжиженном газе различен.

Наибольшей реакционной способностью при образовании смога обладают олефины. Поэтому реакционная способность углеводородов, содержащихся в отработавших газах двигателя при работе на сжиженном газе, ниже (из-за меньшего содержания олефинов).

Испытания легковых автомобилей, переоборудованных для работы на сжиженном нефтяном газе и бензине, показали некоторое ухудшение динамических качеств автомобиля (увеличи-

лось время разгона) и затруднение пуска холодного двигателя. Сжиженный нефтяной попутный газ (пропанобутановая фракция) содержат в баллонах под давлением до 1,6 МПа.

Применение *природного газа* также существенно уменьшает выделение токсичных веществ, особенно продуктов неполного сгорания. Однако его использование затруднено тем, что при температуре окружающей среды природный газ не может быть переведен в сжиженное состояние. Это означает, что его надо хранить под высоким давлением. Сжатый природный газ хранят в баллонах под давлением до 20 МПа, а сжиженный природный – в криогенных сосудах при $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом значении температуры он занимает в 640 раз меньший объем.

2.3.2. Сжатые газы

К сжатым природным газам (*СПГ*) относятся газы, которые при нормальной температуре сохраняют газообразное состояние даже при высоком давлении. Основным компонентом сжатого природного газа является метан.

Теплота сгорания природных газов отдельных месторождений может достигать до 47 МДж/м^3 , однако в среднем она составляет $33...36\text{ МДж/м}^3$. Эта величина почти в 1000 раз меньше, чем у жидкого нефтяного топлива, что и является основным недостатком природного газа как моторного топлива. Поэтому для обеспечения приемлемых эксплуатационных качеств автомобиля, прежде всего запаса хода при работе на природном газе, требуется его специальная подготовка: сжатие до давления 20 МПа и более с последующим хранением на автомобиле в баллонах высокого давления либо сжижение с помощью глубокого охлаждения до $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ с хранением в специальных криогенных (теплоизолированных) емкостях. Кроме того, для газобаллонных автомобилей могут применяться только высоко- и среднекалорийные газы. Однако и при этих условиях запас хода у газобаллонных автомобилей, работающих на сжатом газе, ниже запаса хода автомобилей, работающих на бензине и сжиженном газе (теплотворная способность газо-воздушной смеси ниже теплотворной способности бензино-воздушной смеси, из-за чего мощность двигателя при переводе на сжатый газ без конструк-

тивных изменений снижается на 10–12%). И все же благодаря присущим положительным качествам и из-за большей простоты получения сжатые газы нашли применение в виде топлива для автомобилей.

К природному газу, используемому в сжатом виде в качестве моторного топлива, предъявляются следующие специфические требования: отсутствие пыли и жидкого остатка, а также минимальная влажность. Последнее требование связано с исключением возможности закупорки каналов топливной системы, вызываемой замерзанием и выпадением гидратов вследствие дросселирования и снижения температуры газа при заправке автомобиля. Для обеспечения выполнения этих требований природный газ подвергается очистке с помощью фильтрующего, сепарационного и осушительного оборудования, установленного на газонаполнительных станциях.

Опыт эксплуатации автомобилей, работающих на *СПГ*, выявил ряд положительных сторон, схожих с достоинствами при работе на *СНГ*. При использовании *СПГ* в качестве моторного топлива моторесурс двигателя увеличивается на 35...40%, срок службы свечей на 30...40%, расход моторного масла снижается благодаря увеличению периодичности (срока) его смены в 2...3 раза. Вместе с тем перевод на сжатый природный газ бензиновых автомобилей ведет к ухудшению ряда их эксплуатационных показателей. Мощность двигателя снижается на 18...20%, что ведет к снижению максимальной скорости на 5...6%, увеличению времени разгона на 24...30 % и уменьшению максимальных углов преодолеваемых подъемов. Из-за большой массы баллонов для хранения газа под высоким давлением грузоподъемность автомобиля снижается на 9...14 %. Дальность поездки на одной заправке газа не превышает 200...280 км. Из-за наличия дополнительной топливной системы трудоемкость технического обслуживания и ремонта базового автомобиля увеличивается на 7...8 %.

При использовании природного газа в качестве моторного топлива отмечены его плохие пусковые свойства. Предельное значение температуры холодного пуска двигателя (без дополнительных средств подогрева) на природном газе на 3...8 °С выше,

чем на *СНГ*, и на 10...12 °С, чем на бензине. Трудность пуска объясняется высокой температурой воспламенения метана, а также тем, что в процессе воспламенения после нескольких вспышек на свечах осажается вода, шунтирующая искровой промежуток.

Важным достоинством газовых топлив (*СПГ* и *СНГ*) по сравнению с нефтяными являются лучшие экологические свойства, связанные прежде всего с уменьшением выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателя. Как известно, такими веществами являются окись углерода *СО*, окислы азота *NO_x*, суммарные углеводороды *C_nH_m* и в случае применения этилированных бензинов – соединения свинца. Применение газовых топлив, отличающихся высокой детонационной стойкостью, исключает необходимость использования токсичного антидетонатора ТЭС и поэтому является эффективным фактором снижения загрязнения окружающей среды высокотоксичными свинцовыми соединениями. Изменение содержания окиси углерода при работе двигателя на газе и бензине в зависимости от состава топливно-воздушной смеси примерно одинаково. Однако, учитывая возможность работы газового двигателя на более бедных смесях, при его оптимальной регулировке обеспечиваются более низкие концентрации *СО*. Уровни выбросов *C_nH_m* также примерно одинаковы, однако их состав принципиально отличен. Вредное воздействие углеводородов, образующихся в продуктах сгорания нефтяных топлив, связано, главным образом, с образованием смога. При работе на природном газе углеводородная часть отработавших газов состоит в основном из метана, обладающего высокой устойчивостью к образованию смога.

Окислы азота являются наиболее токсичными компонентами отработавших газов. Их максимальное содержание для газового двигателя примерно в 2 раза меньше, чем для бензинового. Кроме того, оно может быть дополнительно снижено в 2...3 раза за счет регулировки состава топливной смеси.

Эффективность газобаллонных автомобилей, работающих на сжатом газе, возрастает также за счет применения двигателей с повышенной степенью сжатия (до 10), улучшения наполнения

цилиндров рабочей смесью за счет применения впускного трубопровода с большим сечением и без подогрева, увеличения проходного сечения впускных клапанов и продолжительности их открытия путем изменения формы кулачков распределительного вала.

В табл. 2.11 приведены в соответствии с ГОСТ 27577-87 основные требования к сжатому природному газу для газобаллонных автомобилей.

Таблица 2.11

Основные требования к сжатым газам

Показатель	ГОСТ 27577-87
Объемная теплота сгорания, кДж/м ³ , не менее	32600–36000
Относительная плотность по отношению к воздуху, не менее	0,56–0,62
Расчетное октановое число газа, не менее	105
Концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,02
Концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,036
Масса мехпримесей в 1 м ³ , мг, не более	1
Суммарная объемная доля негорючих компонентов, включая кислород, %, не более	7
Содержание воды, мг/м ³ , не более	9
<i>Примечание</i> –Значения установлены при температуре 20 °С и давлении 0,1013 МПа.	

2.4. Альтернативные виды топлив

К альтернативным топливам можно отнести:

- метанол, денатурированный этанол и др. спирты;
- смеси, содержащие не менее 70% (обычно 85%) спирта с бензином или дизельным топливом;
- природный газ (сжатый или сжиженный);
- сжиженный нефтяной газ;
- водород;
- жидкие топлива, полученные из угля и биологических материалов.

В последние годы рассматриваются вопросы производства топлив не нефтяного происхождения. Среди них наибольшее внимание привлекают *метанол, водород и аммиак*.

Метанол.

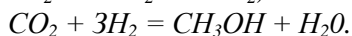
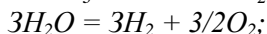
Основные свойства метанола как топлива для двигателей внутреннего сгорания приведены в табл. 2.12

Таблица 2.12

Основные параметры альтернативных видов топлива

Основные свойства	Водород (сжиженный) H_2	Изооктан C_8H_{18}	Метанол CH_3OH	Аммиак NH_3
Температура кипения, °К	20	372	335	240
Скрытая теплота парообразования, кДж/кг	444	303	1168	1377
Состояние при нормальных условиях	Газ	Жидкость		Газ
Условия для сжижения	Температ. 20 °К	Нормальные атмосферные условия		Давл. 1,4 МПа
Низшая теплота сгорания кДж/кг кДж/м ³	120167 8,57*10 ⁶	44800 30,55*10 ⁶	20935 15,835*10 ⁶	18632 13,049*10 ⁶
Пределы воспламеняемости в воздухе, % по объему	74 – 4,1	7,6 – 1,4	36 – 6,7	28 - 15
Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, кг	34,5	15,1	6,4	6,1
Температура самовоспламенения, К	858	721	742	741
Опасные концентрации при длительном воздействии, млн-1		500	200	100

Разработана технология получения метанола из каменного угля с КПД, равным 60—70%. Большой интерес представляет возможность получения метанола из известняка, содержащего 12% углерода по массе. Ниже приведены главные реакции в этом процессе:



Следует отметить, что по сравнению с изооктаном метанол имеет меньшую (примерно в 2 раза) низшую теплоту сгорания, более широкие пределы воспламеняемости, значительно большую (почти в 4 раза) скрытую теплоту парообразования, высо-

кую температуру самовоспламенения и более низкую температуру кипения. Важным преимуществом метанола является его высокая детонационная стойкость. Октановое число метанола при определении по исследовательскому методу равно 109,6, а по моторному — 87,4. Для изооктана ОЧ при определении по обоим методам равно 100. Это позволяет увеличить степень сжатия двигателя до 12...14 ед. и тем самым, благодаря улучшению его топливной экономичности, частично компенсировать повышенные расходы метанола.

Высокая детонационная стойкость метанола в сочетании с возможностью его производства из не нефтяного сырья позволяет рассматривать этот продукт в качестве перспективного высокооктанового компонента автобензинов, получивших название метанольных. Оптимальными являются добавки 5...20 % метанола, при которых бензоспиртовая смесь характеризуется удовлетворительными эксплуатационными показателями и дает ощутимый эффект по экономии нефтяного компонента топлива. Топливо, содержащее максимум 3 % по объему метанола, является стандартным для тех регионов, где его применение экономически целесообразно (Бразилия, южные штаты США).

В настоящее время в США и ряде других стран развернуто производство и потребление топлив, имеющих более высокую концентрацию, как метанола, так и этанола. В частности, это такие марки топлив, как М 85 (смесь из 85 % метанола и 15 % бензина) и Е 85 (смесь из 85 % этанола и 15 % бензина).

Основные параметры спиртов применяемых в качестве топлива представлены в табл. 2.13

Таблица 2.13

Основные параметры спиртов как топлива

Основные свойства	Метанол CH ₃ OH	Этанол C ₂ H ₅ OH	Бутанол C ₄ H ₉ OH	Диметилвый Эфир CH ₃ OCH ₃
1	2	3	4	5
Молекулярная масса	32	46	74	46
Плотность при темп. 20 °С	792	789	810	668 при темп. кип.
Кинематическая вязкость, мм ² /с, при 20 °С	0,73	1,51	2,9	0,22 при темп. кип.
Цетановое число	3	8	18	Более 55

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5
Температура плавления, °С	- 97,9	- 114,2	- 79,9	- 138,5
Температура кипения, °С	64,5	78,4	117,4	- 27,3
Температура самовоспламенения, °С	464	426	390	235
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	19670	26780	33100	28800
Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, кг	6,4	9,0	11,2	9,0
Теплота испарения, кДж/кг	1115	870	650	412
Давление насыщенных паров при 20 °С и 0,1 МПа, кПа	13,0	5,7	3,0	530,9
Теплоемкость при 20 °С и 0,1 МПа, кДж/кг °С	2,51	2,43	2,4	1,43

Основной проблемой при эксплуатации двигателя на метаноле (М 85) является токсичность топлива. Кроме того, оно оказывает корродирующее воздействие на некоторые металлы, прорезиненные детали, прокладки, мембраны. Неяркое пламя затрудняет визуальное обнаружение горения этого топлива при дневном свете.

Этанол (Е 85) также оказывает корродирующее воздействие на некоторые металлы, прокладки и мембраны. Он является менее летучим, чем обычный бензин.

При сравнительных испытаниях 14 автомобилей, работающих на бензине и смеси его с 10% метанола по федеральному ездовому циклу США, было установлено, что использование смеси бензина с метанолом уменьшило в среднем выделение CO на 38%, NO_x — на 8%, а также увеличило выделение C_nH_m на 1%. Поэтому необходимо применять практически те же меры для уменьшения токсичности, что и для бензиновых двигателей.

Одной из серьезных проблем при использовании смесей метанола и бензина является их расслоение при низких температурах, особенно при попадании воды. При высоких температурах смеси бензина с метанолом имеют большую, чем бензин, склонность к образованию паровых пробок.

В случае применения метанола в качестве топлива он может быть использован также в смеси с водой.

Следует отметить, что при работе на метаноле или его смесях с водой несколько улучшается топливная экономичность двигателя.

Водород.

Основные свойства водорода как топлива для двигателей внутреннего сгорания приведены в табл. 2.12. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с углеводородными топливами. Водород имеет наиболее высокую массовую теплоту сгорания среди химических топлив: по этому показателю он превосходит нефтяные топлива примерно в 2,5...3 раза, а спирты – в 5...6 раз. Концентрационные пределы воспламеняемости водорода значительно шире, он хорошо смешивается с воздухом, для его воспламенения требуется малая энергия. В качестве окислителя для сжигания водорода в двигателях внутреннего сгорания может применяться кислород или воздух. В первом случае единственным продуктом сгорания является вода, во втором — вода и окислы азота. Необходимо отметить, что в отработавших газах двигателей будут содержаться также в небольших количествах продукты сгорания смазочного масла (CO и C_nH_m). Из-за высокой температуры самовоспламенения водорода его используют в двигателях с искровым зажиганием.

Основными недостатками водорода как топлива для двигателей являются возможность обратных вспышек (во впускном трубопроводе), преждевременное воспламенение и «грубое» сгорание. Последнее объясняется высокой скоростью сгорания водородных смесей. Указанные недостатки могут быть в значительной степени устранены разбавлением водородно-воздушных смесей инертными компонентами (с этой целью добавляют воду, осуществляют рециркуляцию отработавших газов).

Водород может подаваться в двигатель, как через карбюратор, так и путем непосредственного впрыска в цилиндр. При карбюраторном смесеобразовании водород в газообразном состоянии смешивается с воздухом. Часть воздуха, поступающего в цилиндр, замещается водородом. При стехиометрическом составе смеси водород занимает около 30% объема цилиндра (па-

ры бензина — только примерно 2 %). В результате снижается номинальная мощность двигателя (примерно до 20%).

Вследствие широких пределов воспламеняемости в двигателях, работающих на водороде, можно применять качественное или смешанное регулирование, что существенно повышает индикаторный КПД двигателя при малых нагрузках. Выделение NO_x одноцилиндровым двигателем при работе на бензине и водороде (при внешнем смесеобразовании) показано на рис. 2.2.

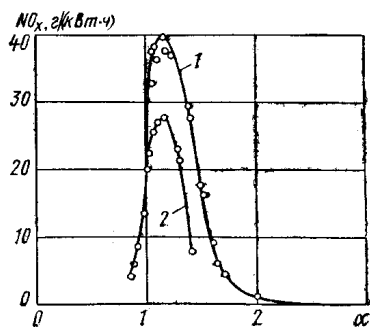


Рис. 2.2. Выделение NO_x одноцилиндровым двигателем при работе на бензине и водороде

1 — работа на водороде; 2 — на бензине

При работе водородного двигателя на очень обедненных смесях ($\alpha > 2,0$) выделение NO_x практически равно нулю.

Результаты проведенных исследований подтверждают пригодность водорода как топлива для двигателей внутреннего сгорания. Основная проблема, которую необходимо решить для широкого использования водорода в транспортных двигателях, состоит в создании условий для хранения водорода (криогенные ёмкости, гидриды металлов и т. д.). Кроме того, из-за очень низкой плотности водорода система его хранения на автомобиле становится чрезмерно громоздкой и тяжелой.

В настоящее время разработаны следующие способы хранения водорода на автомобиле:

- хранение водорода в газообразной форме в баках, рассчитанных на большое давление. В этом случае он хранится под давлением 30 МПа. Это приводит к увеличению массы водорода

и необходимости соблюдения мер безопасности, так как он может проникать через мельчайшие неплотности топливной аппаратуры и при соотношении водорода с кислородом 2:1 образуется взрывоопасная смесь;

- хранение водорода в сжиженном виде (криогенный бак).

Это лучший вариант в отношении снижения массы топлива и повышения плотности энергии (в настоящее время запас хода автомобиля на одну заправку бака составляет около 300 км). Очень низкая температура хранения ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) требует высокой степени теплоизоляции бака. Остаточная теплота заставляет водород выходить наружу через предохранительный клапан, что приводит к его ежедневным потерям (около 2%) при неработающем двигателе. Во время работы двигателя электрический испаритель поддерживает в баке требуемое давление;

- металлгидридное хранение. Некоторые металлы и их сплавы способны разместить между своими атомами атомы водорода и такие соединения называют гидридами (используется титан, который поглощает и выделяет водород). Этот процесс является экзотермическим, т. е. теплота выделяется при заправке бака топливом;

- метилциклогексаноловое хранение. В данном случае на автомобиле происходит испарение метилового спирта и в присутствии катализатора при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит реакция с водяным паром, в результате которой выделяется водород и двуокись углерода (рециркулирующий толуол).

Следует также отметить, что применение водорода значительно улучшает условия работы смазочного масла, так как оно не загрязняется продуктами неполного сгорания.

Прочие виды альтернативных топлив.

Газоконденсатные топлива.

В качестве местных видов топлива разработаны газоконденсатные топлива, предназначенные для использования в дизельных двигателях в районах газоконденсатных месторождений.

К применению допущены три марки газоконденсатного топлива:

- газоконденсатное широкофракционное зимнее (ГШЗ по ТУ 51.28-86);

- газоконденсатное широкофракционное летнее (ГШЛ по ТУ 51.125-86);
- газоконденсатное широкофракционное арктическое (ГША по ТУ 51.03.16-89).

Показатели качества газоконденсатных топлив представлены в табл. 2.14

Таблица 2.14

Показатели качества газоконденсатных топлив

Показатель	Норма для топлива марки		
	ГШЗ	ГШЛ	ГША
Цетановое число, не менее	40	42	40
Фракционный состав, °С:			
начало разгонки при температуре не ниже	-	90	-
10 % перегоняется при температуре не ниже	120	120	120
50 % перегоняется при температуре не выше	260	260	260
96 % перегоняется при температуре не выше	400	600	400
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с, не менее	1,45	2,0	1,45
Температура застывания, °С, не выше, для климатической зоны:			
умеренной	-35	-15	
холодной	45		55
Температура помутнения, °С, не выше, для климатической зоны:			
умеренной	-25	-5	-
холодной	35		
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не выше	12	15	15
<i>Примечание</i> – По остальным показателям качество топлив соответствует требованиям ГОСТ 305-82.			

Топливо *ГШЗ* предназначено для эксплуатации дизелей при температуре – 30°С и выше в умеренной и температуре – 35°С и выше в холодной климатической зоне. *ГШЛ* предназначено для эксплуатации дизелей при температуре воздуха выше – 5°С, а *ГША* – при температуре от – 50°С и выше в холодной климатической зоне.

Их получают прямой перегонкой газовых конденсатов, а также путем смешения дизельных фракций газового конденсата с товарными дизельными топливами.

Особенностью топлив *ГШЗ* и *ГШЛ* являются более низкие значения *ЦЧ* (на 3...5 ед.), температуры t_{50} (на 20 °С), вязкости и температуры вспышки. У обоих топлив нормируется температура t_{106} , при этом у топлива *ГШЛ* дополнительно лимитируется начало кипения.

Синтетическое топливо.

Производство синтетического топлива основано на гидрогенизации каменных и бурых углей водородом при высокой температуре, давлении и в присутствии катализаторов. Так в Германии во время войны 1939...45 годов 100% авиабензина составлял синтетический бензин (в летнее время).

В 1913 году Ф. Бергиус получил в Германии патент на гидрогенизацию низкосортных, высокосольных, малоценных углей. При нагревании таких углей, содержащих значительное количество окислов кремния, алюминия, кальция и магния (имеющих каталитическое действие) в течение 12...15 часов при температуре 400 °С и давлении 20 МПа в атмосфере водорода можно получить выход до 85% летучих веществ и растворимых продуктов. Измельченный уголь смешивается с тяжелыми нефтяными маслами (состояние пасты), загружается в реактор. Получается смесь из не прореагировавшего угля, полукокса и жидких фракций. Тяжелые жидкие фракции идут на новый замес пасты, средние – на каталитическую переработку в бензин. По цене синтетический бензин был в 3...5 раз дороже обычного.

В 1923-26 годах Ф.Фишер и Г.Трюнш разработали так называемый "синтин-процесс". Суть его в том, что смесь окиси углерода (СО) с водородом при температуре 180...200 °С и давлении около 0,2 МПа в присутствии катализаторов (кобальт, железо, никель) реагирует с выходом жидких углеводородов – синтола. Синтол дешевле синтетического бензина, но дороже обычного.

Контрольные вопросы к главе 2

5. Назовите общие свойства топлив для ДВС.
6. Назовите основные требования и основные характеристики бензинов.
7. Назовите основные требования и основные характеристики дизельных топлив.
8. За счет каких мероприятий можно повысить качество автомобильных бензинов?
9. Что такое ОЧ (октановое число) бензина? Что характеризует ОЧ? В чем разница ОЧИ и ОЧМ?
10. Какие автомобильные бензины выпускаются в РФ?
11. Назовите марки дизельных топлив выпускаемых в РФ.
12. Какие газы применяются в качестве газообразного топлива?
13. Назовите преимущества и недостатки применения водорода как топлива.
14. Назовите преимущества и недостатки применения метанола в качестве топлива.
15. Назовите альтернативные виды топлив для ДВС.

ГЛАВА 3. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ

Отработавшие газы (ОГ) дизелей представляют собой многокомпонентную смесь, содержащую продукты полного сгорания топлива (диоксид углерода – CO_2 и вода – H_2O) и продукты неполного сгорания (монооксид углерода – CO , газообразные углеводороды – C_nH_m , альдегиды – $RHCO$, сажа – C).

В ОГ присутствуют также неиспользованный при сгорании топлива кислород O_2 , содержащийся в воздухе азот N_2 и продукты его окисления – оксиды азота NO_x , газообразные продукты окисления серы, имеющейся в топливе (в основном диоксид SO_2).

Кроме газообразных компонентов, в ОГ присутствуют так называемые «твердые частицы», основным компонентом которых является сажа C . Всего ОГ дизелей содержат около 250 компонентов, часть из которых нетоксичны. Токсичность ОГ дизелей определяется 0,1 – 1% объема ОГ. При этом примерно 80 – 95% от общей массы токсичных компонентов приходится на долю пяти из них: NO_x , CO , C_nH_m , альдегидов $RHCO$, диоксида серы SO_2 .

Нормируемыми компонентами являются: оксиды азота NO_x , монооксид углерода CO , углеводороды C_nH_m и сажа C или твердые частицы.

Образование токсичных веществ – *продуктов неполного сгорания и окислов азота* в цилиндре двигателя в процессе сгорания происходит принципиально различными путями.

Первая группа токсичных веществ (*продукты неполного сгорания*) связана с химическими реакциями окисления топлива, протекающими как в предпламенный период, так и в процессе сгорания-расширения.

Вторая группа токсичных веществ (*окислы азота*) образуется при соединении азота и избыточного кислорода в продуктах сгорания.

Реакция образования окислов азота носит термический характер и не связана непосредственно с реакциями окисления топлива.

3.1. Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

Точно определить количество вредных выбросов в атмосферу двигателями внутреннего сгорания практически невозможно. Величина выбросов вредных веществ зависит от очень многих факторов.

Однако на основании данных о среднем статистическом составе смеси для отдельных видов ДВС и соответствующих им величин выброса токсичных веществ на 1 кг израсходованного топлива, зная расход отдельных топлив, можно определить суммарную токсичность ОГ.

В табл. 3.1 приведен средний состав отработавших газов дизеля (по Л.В. Грехову)

Таблица 3.1

Средний состав отработавших газов дизеля (по Л.В. Грехову)

Компоненты ОГ	Конц. в ОГ на различных режимах	Токсичные компоненты ОГ дизеля	
		Концентрация г/м ³	Удельный выброс
Азот N ₂	74 - 78%	-	-
Кислород O ₂	2 - 18%	-	-
Водяной пар H ₂ O	0,5 - 9,0%	15 - 100	-
Диоксид углерода CO ₂	1 - 12%	40 - 240	-
Оксиды азота NO _x	0,004 - 0,5%	1 - 8	10 - 30
В том числе			
монооксид азота NO	0,004 - 0,5%	1,0 - 4,5	6 - 18
диоксид азота NO ₂	0,0001 - 0,013%	0,1 - 0,8	0,5 - 2,0
Монооксид углерода CO	0,0005 - 0,4%	0,25 - 2,5	1,5 - 12,0
Углеводороды C _n H _m	0,009 - 0,3%	0,25 - 2,0	1,5 - 8,0
Бенз(а)пирен C ₂₀ H ₁₂	0,05 - 1,0 мг/м ³	(0,2-0,5) 10 ⁻⁸	(1 - 2)10 ⁻⁶
Сажа С	0,01 - 1,1 г/м ³	0,05 - 0,5	0,25 - 2,0
Диоксид серы SO ₂	0,0018 - 0,02%	0,1 - 0,5	0,4 - 2,5
Триоксид серы SO ₃	(0,4 - 6)10 ⁻⁴ %	-	-
Альдегиды RCHO	0,0001 - 0,002%	1,0 - 10,0	-
В том числе			
Формальдегид HCHO	(1 - 19)10 ⁻⁴ %		-
Акролеин CH ₂ CHCHO	(1 - 1,3)10 ⁻⁴ %	0,001 - 0,04	0,06 - 0,2

Состав ОГ существенно зависит от режима работы двигателя. На основании статистических данных установлено, что в условиях уличного движения в Европе доля времени работы двигателя на отдельных режимах составляет:

- на холостом ходу и средних частотах вращения коленчатого вала двигателя - 35%;
- на постоянных частотах вращения – 29%;
- на режимах ускорения – 22%;
- на режимах замедления – 14%.

В табл. 3.2 приведено процентное содержание токсичных компонентов в ОГ ДВС в зависимости от режима работы двигателя.

Таблица 3.2

Среднее процентное содержание токсичных компонентов в ОГ

Компоненты	Режимы работы двигателя			
	Холостой ход и средние частоты вращения к.в.	Средняя постоянная частота вращения (с нагрузкой)	<i>Разгон</i>	<i>Замедление</i>
Окись углерода, % об.	ИЗ	Диз.	ИЗ	Диз.
Углеводороды, %	7,0	След.	2,5	0,1
Окислы азота, чнм	0,5	0,04	0,2	0,2
Альдегиды, чнм	30	60	1050	850

Приведенные данные свидетельствуют, что при замедлении и при работе на холостом ходу в ОГ двигателей с искровым зажиганием содержится большое количество продуктов неполного сгорания топлива.

В дизелях вследствие сгорания смеси с большим избытком воздуха обнаруживаются только следы содержания *СО*.

Из таблиц видно, что дизели при надлежащем техническом обслуживании в значительно меньшей степени загрязняют атмосферу.

Количество токсичных компонентов, выделенных при сгорании 1 кг топлива (в гр.), с учетом средней величины коэффициента избытка α воздуха представлено в табл. 3.3.

Из данных таблицы 2.3 следует, что общее количество токсичных компонентов, выделенных при сгорании 1 кг дизельного топлива в 10 раз меньше, чем при сгорании 1 кг бензина. Однако в ОГ дизелей содержится в 5 раз больше сажи, которая является продуктом крекинга и неполного сгорания топлива, содержащим большое количество адсорбированных углеводов.

Таблица 3.3

Количество токсичных компонентов при сгорании 1 кг топлива

	Компоненты	Вид топлива	
		Бензин	Диз. топливо
1	Окись углерода	465,59	20,81
2	Углеводороды	23,28	4,16
3	Окислы азота	15,83	18,01
4	Ангидрид серной кислоты	1,86	7,80
5	Альдегиды	0,93	0,78
6	Сажа	1,00	5,00
7	Свинец	0,50	-
8	ВСЕГО	509,99	51,56

Сопоставление величин токсичных выбросов различными силовыми установками, определенными по 13-ти ступенчатому Калифорнийскому испытательному циклу, представлено в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Сопоставление величин токсичных выбросов различными силовыми установками

Силовые установки	Выброс В.В., г/лсч		
	СО	C_nH_m	NO_x
1. Бензиновый двигатель с искровым зажиганием	28	2	16
2. Газовый двигатель с искровым зажиганием	26	3	13
3. Дизель с непосредственным впрыском	3,6	2,2	8,6
4. Дизель предкамерный	1,7	0,2	5,8
5. Паровой двигатель	4,2	0,25	3
6. Газовая турбина	4,4	0,9	2
7. Двигатель Стирлинга	2,8	0,15	1,8

Из данных таблицы следует, что дизель с точки зрения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, может рассматриваться как вполне приемлемый вариант в сравнении с

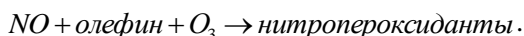
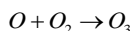
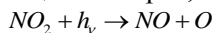
альтернативными вариантами двигателей, что обусловило широкое его распространение.

Согласно санитарным нормам, токсичность CO - длительная допустимая концентрация – 1 мг CO на 1 м³ воздуха (1 млн. доля). Токсичность NO_x в 10 раз выше, а токсичность формальдегида $RCHO$ в 70 раз выше CO . Принято считать, что токсичность C_nH_m в 1,5 раза меньше, чем CO , однако здесь возможны существенные ошибки, т.к. токсичность отдельных компонентов различна – ароматические и особенно олефиновые углеводороды значительно более токсичны, чем парафиновые и нафтеновые.

Токсичность *альдегидов и кетонов* очень велика

Токсичность канцерогенов практически не поддается оценке. Хотя концентрации их в ОГ крайне малы, однако они накапливаются в организме. Тем же свойством накапливаться обладают и окислы свинца, и сернистые соединения.

Помимо прямого вредного воздействия на организм человека, токсичные компоненты вызывают вторичные эффекты – «смог». Причиной образования смога является сложное воздействие окислов азота и непредельных углеводородов. Под влиянием солнечных лучей происходит диссоциация молекул NO_2 с образованием NO и озона, в результате взаимодействия которых с олефинами образуются токсичные нитроперекисные соединения, в частности пероксиацетилнитрат, по следующей схеме:



Присутствие последних в воздухе в количествах более 0,2 мг/м³ вызывает повышение концентрации водяных паров – туман, придавая ему токсичные свойства.

3.2. Образование продуктов неполного сгорания топлива

3.2.1. Сажа

При сгорании углеводородных топлив в ДВС в ОГ может содержаться сажа.

Сажа (С) – твердый углеродный продукт в дисперсном состоянии.

Частица сажи – это агломерат пакетов (кристаллов), которые, в свою очередь, состоят из набора отдельных сеток (пластинок) графитовых шестиугольников. Пакет состоит из 2...5 пластинок диаметром $17...30A^0$ ($1A^0=10^{-10}м$), средней толщиной $3,55A^0$. Сажевые частицы могут иметь диаметр $20...6000A^0$, но обычно от $50...500A^0$. В частице сажи диаметром $200A^0$ содержится около 1500 пакетов.

Образование сажи представляет собой объемный процесс термического разложения (пиролиза) углеводородов в газовой (паровой) фазе в условиях сильного недостатка (отсутствия) окислителя O_2 .

Выделение сажи в процессе сгорания может быть разделено на три основные фазы:

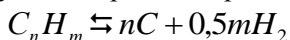
- 1-я фаза – образование зародыша;
- 2-я фаза – рост зародышей в частицы сажи;
- 3-я фаза – коагуляция первичных сажевых частиц.

Скорость образования сажи определяется скоростью химических процессов, приводящих к образованию зародыша (т.е. кинетикой процесса).

При относительно низких температурах $T \leq 1500 K$ реакции полимеризации и конденсации преобладают над реакциями дегидрогенизации. Зародышами в этих условиях могут выступать ароматические и полициклические углеводороды.

При температурах $2000 \div 3500 K$, соответствующих процессу сгорания в двигателе, происходит распад молекул или даже их расщепление.

Реакция пиролиза углеводородов выражается уравнением:



Концентрационный предел начала образования сажи зависит от многих факторов (давления, температуры, вида топлива, вида горелки и т.д.) и по α диапазон составляет $\alpha = 0,33 \dots 0,70$.

С увеличением температуры начало образования сажи сдвигается в сторону богатых смесей, с увеличением давления – в сторону бедных смесей.

Максимум сажесодержания при повышении температуры процесса сдвигается в сторону богатых смесей. Необходимо отметить, что на образование сажи α влияет через физические факторы (температуру пламени, появление зон с концентрациями, благоприятными для термического разложения).

Количество образовавшейся сажи в большой степени зависит от температуры в зоне пиролиза: увеличение температуры приводит к резкому увеличению образования сажи. Подобным же образом влияет и увеличение давления. Образование сажи зависит от свойств топлива: чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажи, это объясняется прочностью связи в зависимости от длины молекулы.

Различные углеводороды (с одинаковым числом атомов C) по степени склонности к образованию сажи располагаются в следующем порядке:

- нормальные парафины;
- изопарафины;
- циклопарафины;
- олефины;
- циклоолефины;
- диолефины;
- ароматические углеводороды.

В процессе образования и после образования сажевых частиц может происходить выгорание их в реакциях с радикалами OH и кислородом.

В основном при обедненных составах смеси происходит прямое окисление сажи кислородом. Скорость выгорания сажи существенно зависит от размеров сажевых частиц (поверхности). Образовавшаяся сажа может выгорать только в том случае, если размеры частиц не превышают $100A^0$.

В двигателях ИЗ, имеющих в цилиндре перед камерой сгорания гомогенную (или достаточно близкую к ней) топливовоздушную смесь, содержание сажи в ОГ незначительно.

В цилиндре дизеля происходит диффузионное сгорание гетерогенной смеси. При этом в зоне пламени состав смеси близок к стехиометрическому и температуры соответственно высоки.

К этим зонам с высокой температурой примыкают зоны со значительно более богатой смесью (вплоть до $\alpha = 0$). Здесь создаются условия благоприятные для пиролиза с малым доступом кислорода. Таким образом, характер смесеобразования и сгорания в дизеле, предопределяет значительно большее, по сравнению с бензиновым, образование сажи.

Первичные структуры, из которых состоит сажа, представляют собой частицы сферической формы диаметром $150 \dots 1700 \text{ \AA}$ с удельной поверхностью $76 \text{ м}^2/\text{г}$. В процессе сгорания происходит коагуляция частиц сажи, приводящая к образованию вторичных и третичных структур. Сажа в ОГ дизелей представляет собой образования неправильной формы линейных размеров $0,3 \dots 100 \text{ мкм}$. Большая часть сажевых образований имеет размер $0,4 \dots 0,5 \text{ мкм}$.

В процессе расширения газов в цилиндре дизеля к частицам сажи поступает кислород (движение газов и диффузия кислорода), и создаются благоприятные условия для выгорания сажи.

Исследования показали, что значительная часть сажи выгорает в процессе расширения.

Кроме того, образование сажи в дизелях может происходить также при попадании топливных струй на относительно холодные стенки камеры сгорания.

Наиболее склонны к сажеобразованию тяжелые ароматические углеводороды. Наличие дыма (уменьшение прозрачности и неприятный запах ОГ) всегда сопряжено с опасностью содержания в нём канцерогенных веществ.

Токсические свойства сажи обусловлены не углеродом, а присутствием в ней канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). В ОГ дизеля обнаружено более 20 различных ПАУ. Их основой является структура, называемая *бензольным ядром*, содержащая шесть атомов углерода, соединённых в кольцо, с тремя одинарными и тремя двойными связями. Некоторые ПАУ, кроме бензольного ядра, имеют одну или несколько боковых цепей. В ОГ дизелей содержатся, в основном, углеводороды, в молекулы которых входят две, три и четыре кольцевые структуры и 12-20 атомов углерода. Наиболее опасен среди них бенз(α)пирен $C_{20}H_{12}$, являющийся индикато-

ром присутствия в ОГ и других ПАУ. В КС дизеля ПАУ адсорбируются частицами сажи и удерживаются ими.

Эффективный путь снижения образования сажи и дыма сводится к такой организации рабочего процесса, при котором жидкое топливо и его пары отделены от зоны горения при $\alpha = 0,9 \dots 1,0$.

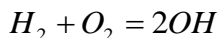
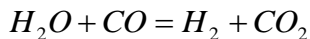
3.2.2. Окись углерода

Конечной стадией сгорания углеводородов является реакция дожигания окиси углерода. Даже при сгорании бедных смесей со значительным избытком воздуха вследствие локальных различий в составе смеси образуется *окись углерода (CO)*.

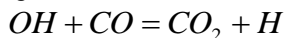
В ДВС образование *CO* может происходить в ходе холодно-пламенных реакций (в дизелях), при сгорании топливовоздушных смесей с некоторым недостатком кислорода, а также вследствие диссоциации CO_2 , происходящей при высокой температуре (при $T > 2000^\circ C$), а также в пристеночных слоях, где $T^\circ C$ еще достаточна для развития начальных стадий окислительных реакций, но недостаточна для догорания *CO* в CO_2 .

В процессе последующего сгорания и расширения при наличии кислорода возможно дожигание *CO* до CO_2 . Процесс дожигания *CO* в углеводородном пламени определяет время реакции. Присутствие углеводородов сильно затормаживает процесс окисления *CO*. Процесс горения *CO* происходит по цепному механизму, который может быть представлен следующими стадиями:

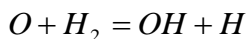
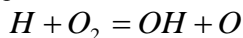
зарождение цепей:



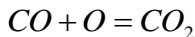
продолжение цепей:



разветвление цепей:



обрыв цепей:



обрыв цепей на стенках:



Скорость процесса определяет наиболее медленная реакция. Таким образом, окисление CO зависит от концентрации H_2 (водорода) и гидроксила (OH) в продуктах сгорания.

В определенный момент расширения происходит «закалка» продуктов догорания окиси углерода.

При составе смеси, близком к стехиометрическому, температура «закалки» равна примерно 1020 K , несколько увеличивается, приближаясь при $\alpha = 0,7$ к максимальной теоретической температуре цикла.

При горении обогащенных смесей соотношение между парциальными давлениями CO_2 , паров H_2O , CO и H_2 определяется константой равновесия: $k_T = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}$, зависящей от темпера-

туры пламени, чем выше температура пламени, тем больше k_T .

Закалка продуктов реакции, т.е. отсутствие дальнейшего изменения их относительных концентраций при охлаждении продуктов сгорания, происходит при $T \leq 1000\text{ K}$.

Это приводит к тому, что в ДВС концентрации CO , как правило, успевают достигнуть равновесного значения, отвечающего температуре конца расширения, в результате чего содержание CO в ОГ двигателей легкого топлива почти не зависит от таких факторов, как степень сжатия, частота вращения к.в., угла опережения зажигания, и практически является функцией α (рис. 3.1) при условии равномерного распределения смеси по отдельным цилиндрам.

Содержание CO в ОГ снижается до десятых долей % лишь при $\alpha = 1,10 \div 1,15$. Дальнейшее увеличение α приводит к росту концентрации CO вследствие замедленного и неполного сгорания сильно обедненных смесей, в особенности в пристеночных слоях в условиях быстрого снижения P и T в такте расширения.

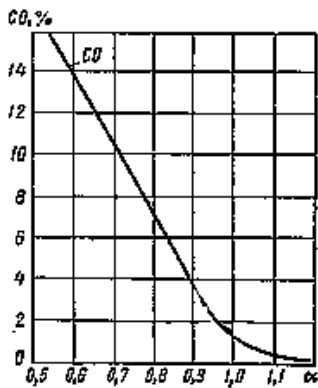


Рис. 3.1 Изменение концентрации СО в зависимости от состава смеси

Поступая в организм через органы дыхания, СО взаимодействует с гемоглобином и образует карбоксигемоглобин, не обладающий способностью переносить кислород к тканям. Наряду с этим уменьшается коэффициент утилизации кислорода тканями. Возникают гипоксемия, затруднение диссоциации оксигемоглобина, ферментные нарушения тканевого дыхания и т. д. Защитную роль играет железо плазмы крови: его соединение с СО препятствует

образованию карбоксигемоглобина и способствует извлечению СО из тканей. При острых отравлениях наблюдается головная боль, головокружение, тошнота, рвота, слабость, одышка, учащённый пульс; возможны быстрая потеря сознания, судороги, кома (с последующим двигательным возбуждением), нарушения кровообращения и дыхания, поражение зрительного нерва и т. д.; на 2–3-и сутки может развиваться токсическая пневмония. Первая помощь: вынести пострадавшего на свежий воздух, растереть грудь; вдыхание паров нашатырного спирта, горячее питье. При хронических отравлениях появляются головная боль, головокружение, бессонница, возникает эмоциональная неустойчивость, ухудшаются память, внимание. Возможны органические поражения центральной нервной системы, сосудистые спазмы, повышение количества эритроцитов в крови.

3.2.3. Несгоревшие углеводороды C_nH_m

В отработавших газах двигателя содержится свыше двухсот различных углеводородов. Это объясняется тем, что даже в двигателях с искровым зажиганием смесь не является гомогенной. Температура в процессе сгорания смеси различна по объёму камеры, что изменяет условия сгорания.

Исследованиями было установлено, что вблизи относительно холодных стенок камеры сгорания происходит гашение пламени. Это приводит к замедлению или исключению реакций горения смеси, находящейся в зоне гашения. Установлено, что количество углеводородов в пристеночной зоне в 6 раз больше, чем в отработавших газах. Таким образом, зона гашения является одним из источников выделения C_nH_m .

На количество C_nH_m , выбрасываемых двигателем, оказывают влияние две группы факторов:

1. Факторы, влияющие на количество несгоревших углеводородов в КС:

- отношение $F_{КС}/V_{КС}$ (площади стенок камеры сгорания к ее объему);
- процентное содержание остаточных газов в свежей смеси (γ_r);
- параметры процесса сгорания;
- турбулентность смеси;
- состав смеси;
- процесс дожигания в камере сгорания.

2. Факторы, влияющие на количество несгоревших углеводородов в ОГ:

- степень однородности ОГ в цилиндре в момент открытия выпускного клапана;
- локальное распределение ОГ с высокой концентрацией C_nH_m ;
- обратный заброс ОГ в цилиндры двигателя при открытом выпускном клапане;
- дожигание углеводородов в выпускном трубопроводе, выпускной трубе и глушителе.

Кроме этого, углеводороды различного состава могут образовываться в зонах с переобогащенной смесью, где происходит пиролиз.

В бензиновых ДВС с хорошо организованными процессами смесеобразования и сгорания на всех нагрузочных режимах и х.х. при значениях α , лежащих в пределах $0,9 \div 1,1$, концентрация C_nH_m в ОГ обычно не превышает 400 чнм (0,04% по объему).

Если рассматривать в качестве топлива гексан, то при $\alpha = 1$ отношение числа молей C_6H_{14} к числу молей продуктов его полного сгорания составляет 2%. Это означает, что остается около 2% несгоревшего топлива, а соответственно и горючей смеси.

При наличии сильного дросселирования, содержание C_nH_m в ОГ возрастает, что вызывается рядом причин:

- уменьшением в связи с падением давления скорости и полноты сгорания, как вследствие снижения скоростей химических реакций, так и существенно меньшей интенсивности турбулентности;
- увеличением относительной величины теплоотдачи, так как теплопроводность газов от давления не зависит, а температура стенок ниже.

В дизелях положение значительно лучше, так как давление сжатия на режимах холостого хода (в т.ч. и принудительного), практически остается таким же, как и на режимах больших нагрузок, а содержание в остаточных газах CO_2 и H_2O уменьшается. Но вследствие снижения температуры стенок камер сгорания, происходит увеличение задержек воспламенения, в связи с чем успевают образоваться зоны переобедненной смеси, уже неспособной гореть. Разбавление же таких зон избыточными количествами воздуха приводит к полному прекращению химических реакций и соответственно увеличению выхода C_nH_m .

Легкие газообразные углеводороды C_nH_m ОГ дизелей относятся, в основном, к парафиновым (метан – CH_4 , этан – C_2H_6 , пропан – C_3H_8 , бутан – C_4H_{10}) и олефиновым углеводородам (этилен – C_2H_4 , пропилен – C_3H_6 , бутилен – C_4H_8). В бензиновых двигателях на долю метана приходится 14 – 58% от общего содержания в ОГ несгоревших углеводородов, а в дизелях – 2 – 6%. Другие углеводороды присутствуют в ОГ дизелей в меньших количествах.

3.2.4. Альдегиды

Альдегиды (от лат. *alcohol dehydrogenatus* спирт, лишённый водорода) — класс органических соединений, содержащих альдегидную группу ($-CHO$), связанную с одной группой R.

В дизелях альдегиды образуются в период предпламенных реакций (холодное пламя). Альдегиды и перекиси – типичные продукты этих реакций.

При образовании альдегидов выделяется тепло. В процессе самовоспламенения топлива они активной роли не играют.

В ДВС альдегиды могут образовываться, если часть процесса сгорания протекает при низких температурах, что наблюдается при охлаждении смеси холодными стенками камеры сгорания или при сгорании сильно обедненной смеси в конце процесса сгорания в двигателях с послыйным смесеобразованием.

В процессе сгорания, происходящем при высокой температуре, альдегиды могут сгорать.

Основные представители: формальдегид – $HCHO$ и акролеин – CH_2CHCHO .

3.3. Окислы азота

Оксиды азота (NO_x) – неорганические бинарные соединения азота с кислородом.

Окислы азота – это соединения азота с кислородом.

Известны N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 (и его димер - N_2O_4), N_2O_5 ; есть сведения о существовании NO_3 , не выделенного в свободном состоянии. При высокой температуре из смеси азота с кислородом образуется окись азота NO , которая при охлаждении переходит в NO_2 .

N_2O_3 - твёрдое вещество; остальные окислы при обычных условиях газообразны.

Закись азота N_2O – бесцветный газ со слабым приятным запахом и сладковатым вкусом; вдыхание смеси воздуха с N_2O вызывает состояние, напоминающее опьянение (отсюда название – веселящий газ). Плотность при $0^\circ C$ и 760 мм рт. ст. – $1,9804 \text{ кг/м}^3$, $t_{кип} - 89.5^\circ C$, $t_{пл} - 102.4^\circ C$, 1 объём N_2O при $5^\circ C$ растворяет 1,048 объёма H_2O . Химически N_2O с водой, растворами кислот и щелочей не реагирует, кислородом не окисляется. Выше $500^\circ C$ разлагается – $2N_2O = 2N_2 + O_2$ и поэтому при повышенных температурах действует как *сильный* окислитель и поддерживает горение. Закись азота иногда используется для

улучшения технических характеристик двигателей внутреннего сгорания. В случае автомобильных применений вещество, содержащее закись азота, и горючее впрыскиваются во впускной (всасывающий) коллектор двигателя, что приводит к следующим результатам:

- снижает температуру всасываемого в двигатель воздуха, обеспечивая плотный поступающий заряд смеси;
- увеличивает содержание кислорода в поступающем заряде (воздух содержит лишь ~21% кислорода по массе);
- повышает скорость (интенсивность) сгорания в цилиндрах двигателя.

Окись азота NO – бесцветный газ, буреющий при соприкосновении с воздухом вследствие окисления до N_2O . Плотность при $0^\circ C$ и 760 мм рт. ст. – 1,3402 кг/м³, $t_{кип}$ – $151,8^\circ C$, $t_{пл}$ – $163,6^\circ C$. В воде мало растворима (0,0738 объёма в 1 объёме H_2O при $0^\circ C$). С водой, кислотами и щелочами химически не взаимодействует. Образует многочисленные продукты присоединения, например нитрозилхлорид $NOCl$.

Трехокись азота (азотистый ангидрид) N_2O_3 – в обычных условиях неустойчивое соединение. Разлагается уже при $0^\circ C$: $N_2O_3 \leftarrow NO + NO_2$; около $3,5^\circ C$ кипит с разложением, при $25^\circ C$ содержит только 10% недиссоциированного N_2O_3 . При низкой температуре может быть получен в виде тёмно-голубой жидкости, при сильном охлаждении – светло-голубой массы с $t_{пл}$ – $102^\circ C$. С водой образует азотистую кислоту: $N_2O_3 + H_2O = 2HNO_2$, со щелочами – соли (нитриты).

Двуокись азота NO₂ – бурый газ с удушливым запахом, при $21,15^\circ C$ – буро-красная жидкость, бледнеющая при дальнейшем охлаждении из-за образования четырёх окиси азота N_2O_4 , $t_{отв}$ – $11,2^\circ C$. Взаимодействует с водой с образованием азотной кислоты и окиси азота: $3NO_2 + H_2O = 2HNO_3 + NO$; со щелочами образует нитраты и нитриты. Двуокись азота – сильный окислитель; в потоке NO_2 энергично сгорают уголь, сера, фосфор, органические соединения.

Азотный ангидрит (пятиокись азота) N_2O_5 , – бесцветные очень летучие кристаллы. Крайне неустойчив и взрывоопасен.

Взаимодействует с водой, давая азотную кислоту:
 $N_2O_5 + H_2O = 2HNO_3$, со щелочами образует соли – нитраты.

В процессе сгорания топлив окислы азота (практически лишь окись азота NO) образуются в результате окисления азота кислородом воздуха. Взаимодействуя с парами воды в воздухе, образуют азотную кислоту, разрушающую легочную ткань, вызывающую необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе.

В процессе взаимодействия окислов азота и ненасыщенных углеводородов образуются нитроолефины, вызывающие заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, нервные расстройства. В реакции образования NO может участвовать как азот, содержащийся в топливе, так и атмосферный азот. Наличие окислов азота в отработавших газах может быть связано с процессами, происходящими не только внутри камеры сгорания, но и выпускной системе двигателя. Окислы азота могут образовываться также в результате процессов фотосинтеза, происходящих в атмосферном воздухе.

В нефтепродуктах содержится до 5% азотных соединений (0,3...0,6% по весу чистого азота). Основными азотосодержащими компонентами твердого и жидкого топлива является пиридин и его производные.

Азот топлива легче вступает в реакцию окисления, чем атмосферный азот. При содержании в топливе азота в 1,4% по весу было зафиксировано в процессе сгорания увеличение выброса азота NO примерно в 10 раз. Исследования, выполненные на лабораторных установках с добавкой азотосодержащих соединений, показали, что количество образовавшихся окислов азота не зависит от типа азотосодержащего компонента и определяется содержанием чистого азота в топливе.

Общепринятой теорией образования окиси азота NO из атмосферного воздуха (азота) и кислорода в процессе сгорания является термическая теория. Основные положения этой теории (теории Зельдовича):

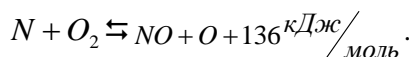
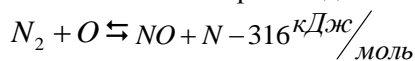
1. Окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания;

2. Выход окиси азота определяется максимальной температурой горения, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива (при отсутствии в топливе азота).

По данным Я.Б.Зельдовича энергия активации образования NO превышает $5 \cdot 10^5 \text{ кДж/моль}$.

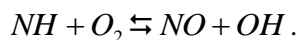
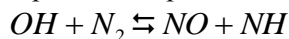
Так как согласно закону Аррениуса зависимость скорости реакций от температуры выражена тем резче, чем выше энергия активации и ниже температура, то повышение T_z с 2500 до $2600K$ приводит, при прочих равных условиях, к увеличению скорости реакции в 2,6 раза. А снижение T_z с 2500 до $2300K$ уменьшает скорость образования NO в 8 раз.

Окисление азота происходит по цепному механизму:



Определяющей реакцией является реакция $N_2 + O$, скорость которой зависит от атомарного кислорода.

В условиях, когда в газовой смеси содержатся пары воды, механизм процесса образования NO может быть комбинированным:



Однако основным механизмом термического образования NO является реакция через атомы кислорода.

Выход окислов азота зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания, т.к. несколько слабее, но также очень сильно зависит от температуры скорость разложения NO , как в обратных реакциях, так и в реакции $NO + NO = N_2 + O_2$.

В результате этого при быстром охлаждении продуктов сгорания в такте расширения происходит «замораживание» содержания в них NO на уровне, близком к тому, который отвечает максимальным значениям T_z , т.е. при медленном охлаждении скорость прямой реакции падает быстрее, чем обратной, а значит, концентрация NO несколько снизится за счет его разложения.

В бедных смесях (при малой подвижности реакции) выход NO определяется максимальной температурой взрыва.

В богатых смесях выход NO перестает зависеть от максимальной температуры взрыва и определяется кинетикой разложения, т.е. «закалкой» образовавшейся окиси азота.

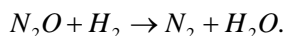
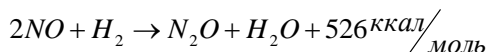
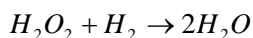
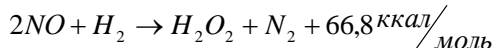
Концентрация NO не превышает равновесную концентрацию при максимальной температуре взрыва.

Махе-эффект (неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания) *заметно* влияет на выход NO при горении *бедных смесей* и *слабо* влияет при горении *богатых*.

Оксид азота не является единственным продуктом неполного сгорания, так как помимо основной реакции окисления, происходит вторичная реакция – $2NO + O_2 = 2NO_2$ и при температуре выше $1500K$ NO_2 распадается на кислород и оксид азота.

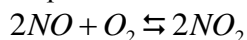
Оксиды азота образуются не только в камере сгорания, но и вне её.

Процесс образования NO в присутствии водорода может осуществляться различными реакциями:



При максимальных температурах цикла в ДВС образуются практически только NO . В ОГ двигателей с искровым зажиганием содержание NO составляет $98,0 \div 99,5\%$ от количества всех окислов азота, в ОГ дизелей – $95,0 \div 98,0\%$.

В выпускной системе двигателя (при наличии кислорода в ОГ) при выходе ОГ в атмосферу происходит окисление NO до NO_2 по реакции:



При нормальных условиях NO окисляется до NO_2 в течение $1 \div 100$ часов в зависимости от концентрации в воздухе.

Основной токсичный компонент ОГ дизелей вне зависимости от их типа, размерности и конструктивных особенностей – оксиды азота NO_x . Их доля в суммарных токсичных выбросах составляет $30 \div 80\%$ по массе и $60 \div 95\%$ по эквивалентной токсичности. Из оксидов азота NO_x содержащихся в ОГ дизелей, $95 \div 98\%$ приходится на монооксид NO и $2 \div 5\%$ - на диоксид NO_2 . При этом токсичность NO_2 в 7 раз выше токсичности NO .

Увеличение выхода NO_x в двигателях лёгкого топлива вызывают все факторы, увеличивающие T_Z :

- увеличение угла опережения зажигания $\theta_{зак}$;
- повышение степени сжатия ε ;
- усиленный подогрев заряда на впуске ΔT_{en} ;
- увеличение скорости сгорания за счет большей турбулизации смеси.

На образование NO оказывает влияние не столько T_Z , сколько местные повышения температуры.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Каков состав отработавших газов?
2. Назовите физико-химические основы образования токсичных веществ в цилиндре двигателя.
3. Что такое сажа? Объясните процесс образования.
4. Что такое окись углерода? Объясните процесс образования.
5. Что представляют собой несгоревшие углеводороды C_nH_m ? Как они образуются?
6. Что такое альдегиды R-CHO? Каков процесс их образования.
7. Что представляют собой окислы азота NO_x ? Объясните процесс их образования.
8. Какими параметрами определяется выход окиси азота?
9. Какие режимы работы двигателя наиболее токсичны?

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Первый в мире закон, определяющий ПДК (предельно допустимую концентрацию) основных токсичных компонентов (окиси углерода и углеводов) в отработавших газах, был принят в США в 1959 г. на основании опыта штата Калифорния.

В последующие годы его неоднократно дополняли, вводя нормы, определяющие предельные допустимые нормы на выброс окислов азота, картерных газов и допустимую степень дымности отработавших газов дизельных двигателей.

На основании калифорнийского опыта правительство США разработало стандарты, которые вступили в действие с 1968 г. Начиная с 1969 г. в ряде европейских стран, а также в Японии, Канаде и Австралии были введены аналогичные стандарты на ограничение токсичности отработавших газов.

4.1. Методы отбора газовых проб для оценки выброса вредных веществ отработавшими газами

Существует три метода отбора газовых проб для оценки наличия вредных веществ в отработавших газах:

- *непрерывный отбор газа* с последующим анализом его состава и измерением общего количества;
- *непрерывный отбор газа с разбавлением его воздухом* так, что объем отобранного количества ОГ остается при разных испытаниях постоянным (*метод постоянного объема, метод CVS – Constant Volume Sampling*);
- *периодический отбор газовых проб* в разные, строго фиксированные моменты времени.

Первый метод заключается в том, что ОГ испытуемого автомобиля (двигателя), расположенного на стенде шасси-динамометра (тормозного стенда), охлаждаются в теплообменнике с последующим удалением из них влаги и отбираются в специальный пробоотборный мешок из полиэфирной пленки (ёмкость мешка порядка 4 м^3). Таким образом, в объеме получают среднее значение концентрации компонентов ОГ, выбрасываемых двигателем в течении заданного промежутка времени.

Этот метод определения состава ОГ является весьма выгодным для оценки абсолютного количества каждого компонента вредных выбросов (CO , NO_x , C_nH_m и др.), выделяемых двигателем в единицу времени. Метод широко применяется в странах ЕЭС.

При использовании *второго метода* весь объем ОГ двигателя разбавляют чистым воздухом (в соотношении не менее $1:10$) в строгом соответствии с изменением расхода ОГ и, поддерживая суммарный объем газо-воздушной смеси постоянным, производят отбор проб. Концентрация токсичных компонентов в газо-воздушной смеси при этом в любой момент времени пропорциональна скорости выделения массы вредных выбросов и, соответственно, пропорциональна количеству этих веществ в атмосфере. При анализе ОГ на токсичность часть разбавленных чистым воздухом ОГ отбирают в пробоотборный мешок (ёмкостью 200л , в зависимости от модели газоанализатора) и на основании их концентраций и всего объема отобранных проб, вычисляют вес вредных веществ в пробах.

Независимо от метода отбора ОГ при испытаниях двигателей, концентрацию газообразных вредных веществ, содержащихся в ОГ, выражают в следующих единицах:

- в объемных или массовых процентах – % об, % масс.;
- в удельных показателях – удельные выбросы в граммах выброса вещества:
 - на испытание, на цикл ($г/испытание$, $г/цикл$);
 - на единицу пути ($г/км$);
 - на единицу мощности, затраченной двигателем ($г/л.с.ч.$, $г/кВт·ч$);
 - в процентах (объемных, массовых) от массы израсходованного топлива (используется редко);
 - малую концентрацию выражают количеством частей на миллион ($чм$, ppm - parts per million).

4.2. Методы испытания с целью определения выбросов вредных веществ и дымности отработавших газов

1. *Испытания ДВС в составе автомобиля на стенде с беговыми барабанами* (для легковых автомобилей, легких грузовиков с полной массой до 3,5 т и микроавтобусов).

Нормативные (предельные) значения контролируемых параметров выражаются в г/км или в г/испытание (*Правила ЕЭК ООН №83 и ECE R 15/05*).

2. *Испытания ДВС на моторном стенде.*

Значения контролируемых параметров выражаются в г/кВт·ч (*Правила ЕЭК ООН №49*).

Для объективной оценки токсичности и дымности ОГ необходимо иметь такую методику испытаний, при которой режимы работы двигателя (режимы движения автомобиля) были бы максимально приближены к реальным и в то же время обеспечивалась бы их полная идентичность.

Для обеспечения этих условий разработаны так называемые *ездовые испытательные циклы*, которые представляют собой программу режимов работы двигателя (движения транспортного средства) по времени, составленную на основе статистической обработки реальных эксплуатационных режимов работы.

Условия движения в городах Европы, США и Японии различны.

В связи с этим, испытательные циклы отличаются по продолжительности и режимам работы двигателя и поэтому величины допустимых концентраций компонентов, определяемые различными испытательными циклами несопоставимы.

Оценку токсичности автомобильных двигателей на основе испытательных циклов производят в целях:

- определения соответствия выделяемых токсичных компонентов нормируемым значениям;
- исследования влияния конструкции и параметров работы двигателя на токсичность автомобиля.

При испытании на беговых барабанах автомобиль ставится ведущими колесами на барабаны стенда. Нагрузка тормоза подбирается таким образом, чтобы при максимальной (на данном

участке цикла) скорости автомобиля разрежение во впускном коллекторе при испытаниях автомобиля на стенде соответствовало реальному разрежению при движении его по ровной дороге с хорошим покрытием. На приводном валу стенда монтируют инерционные массы, с моментами инерции, равными моментам инерции автомобиля. Это необходимо для обеспечения воспроизводимости действительных условий движения на режимах ускорения и замедления. Отработавшие газы, выбрасываемые двигателем, собираются в эластичные ёмкости. Не позднее чем через 20 мин. после испытаний пробы газа из ёмкости подвергаются анализу с целью определения среднего объемного содержания токсичных компонентов. Массу газов, выделенных двигателем во время испытаний и собранных в ёмкость, определяют при помощи газового счетчика. Затем определяют массу CO и C_nH_m , приходящиеся на 1 км пробега или на весь цикл испытаний.

В настоящее время широкое распространение при испытаниях ДВС и энергетических установок с ними на токсичность и дымность ОГ находят следующие испытательные циклы:

- Федеральный FTP-75 (*Federal Test Procedure*);
- Калифорнийский;
- Европейский, 13-ти ступенчатый;
- (*Правила ЕЭК ООН №15*);
- Японские 10-ти, 11-ти и 15-ти ступенчатые.

Отличие указанных циклов друг от друга заключается в основном в различии их скоростных и нагрузочных режимов.

4.3. Испытательные циклы

4.3.1. Федеральный цикл FTP-75

Цикл определяет режимы работы и методы испытания транспортных средств на токсичность и дымность ОГ.

Схема испытательного стенда, работающего по режимам федерального цикла, показана на рис. 4.1.

Отбор газов, разбавленных по CVS, производят в три специальные ёмкости 11: по одной на каждую фазу испытаний (*ст* –

холодный режим; s – установившийся режим; h_t - горячий режим).

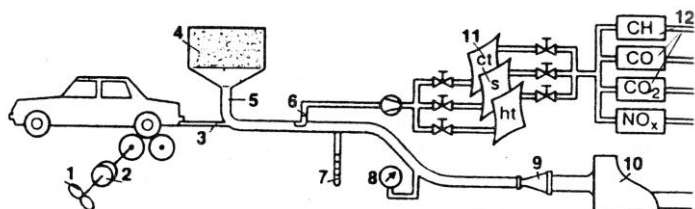


Рис. 4.1. Схема стенда для испытаний по циклу FTP-75:

1 – тормозное устройство; 2 – инерционные массы; 3 – система отбора ОГ; 4 – воздушный фильтр; 5 – подача добавочного воздуха; 6 – отбор газовой смеси; 7 – термометр; 8 – манометр; 9 – сужение; 10 – побудитель расхода (вентилятор); 11 – ёмкости для пробы; 12 – газоанализаторы

Цикл FTP-75 представляет собой городской «ездовой» цикл, состоит из испытаний по методу CVS (CVS Test) (рис. 4.2).

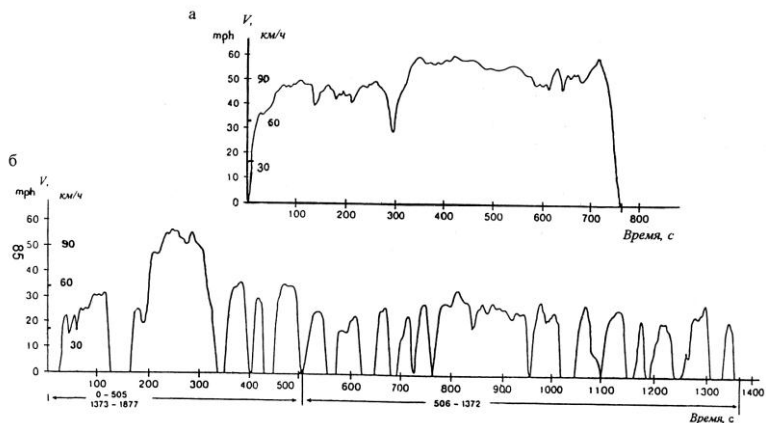


Рис. 4.2. Испытательные циклы США (US Driving Cycles):

а – цикл испытания на топливную экономичность (EPA Highway Fuel Economy Driving Schedule); б – федеральный цикл FTP-75 (EPA Urban Dynamometer Driving Schedule)

Цикл FTP-75 содержит четыре фазы/этапа:

- 1 этап - холодный неустановившийся режим (после пуска холодного двигателя) в течение $0-505c$;

- 2 этап - установившийся режим 506-1365с (860с);
- 3 этап - остановка 1366-1966с (600с);
- 4 этап - горячий неустановившийся режим 1967 – 2562с (595с).

Общее время испытаний составляет 2477с (41,5 мин) вместе с холостым ходом, который составляет 17,9%, а продолжительность одного цикла – 1372с.

Средняя скорость транспортного средства при испытаниях равна 31,67км/ч (19,68миль/ч), а максимальная 91,2км/ч (56,7миль/ч).

Имитация пробега за один цикл равна 10,15км (примерно 7миль), а общего пробега – 17,89км (примерно 11,1мили).

4.3.2. Европейский испытательный цикл

Европейский испытательный цикл был разработан Европейской Экономической Комиссией ООН (Правила ЕЭК ООН №15) и применяется в странах Европы.

Испытания транспортных средств с бензиновыми двигателями проводят на стенде, схема которого показана на рис.4.3, в соответствии с *испытательным циклом* (табл. 4.1) 4 раза.

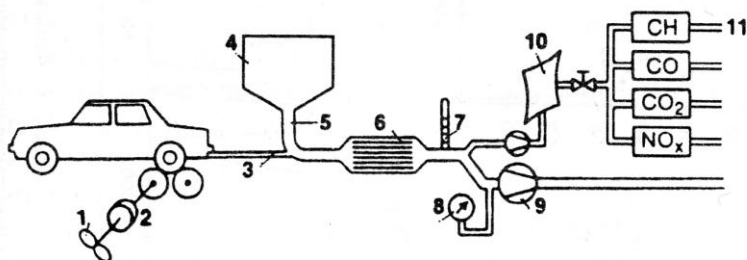


Рис. 4.3. Схема установки для испытания автомобилей по европейскому испытательному циклу:

1 – тормозное устройство; 2 – инерционные массы; 3 – система отбора ОГ; 4 – фильтр воздуха; 5 – подача добавочного воздуха; 6 – теплообменник; 7 – термометр; 8 – манометр; 9 – побудитель расхода с расходомером; 10 – ёмкость для ОГ; 11 – газоанализаторы

Полный цикл испытаний соответствует среднему пробегу автомобиля на пути 4,052км (1,013км за испытательный цикл) в

условиях городского движения. Средняя скорость движения транспортного средства равна $18,7\text{ км/ч}$ ($27,01\text{ км/ч}$ без учета холостого хода, который составляет 21%), а максимальная скорость – 50 км/ч .

Параметры режимов работы автомобиля на рис.4.4. Испытания начинают с пуска холодного двигателя, а до начала испытаний автомобиль выдерживают в течении 6 ч в помещении при температуре $20...30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время испытаний одного цикла составляет 195 с , а общая продолжительность испытаний 820 с (13 мин). Программное устройство стенда обеспечивает заданный ездовым циклом нагрузочный и скоростной режимы испытаний двигателя.

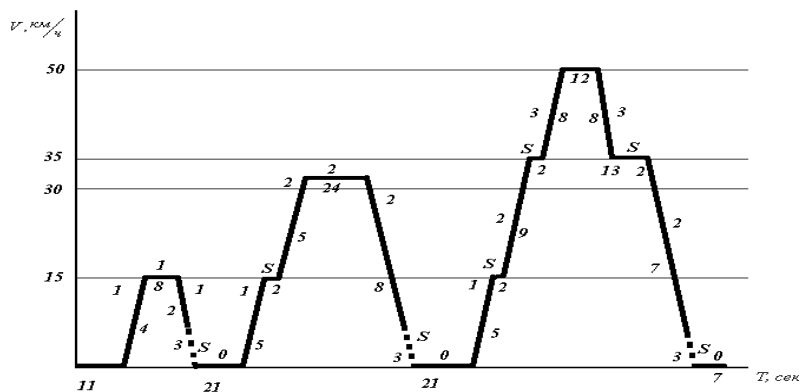


Рис. 4.4. Схема Европейского испытательного цикла:
S – переключение скоростей; 1, 2, 3 (над графиком) – передачи;
 11, 4, 8, ... (под линией графика) – время

Европейский испытательный цикл представляет три типа проверок.

Испытания 1-го типа проводятся на тормозном стенде в соответствии с испытательным циклом, повторяющимся 4 раза. Полный цикл соответствует среднему пробегу $4,052\text{ км}$ в условиях городского движения. Проверка начинается с пуска холодного двигателя. Автомобиль до начала испытаний в течении 6 часов выдерживают при температуре $20...30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Параметры ре-

жимов работы автомобиля на стенде представлены в табл. 4.1 и на рис. 4.4.

Таблица 4.1

Европейский испытательный цикл				
Режим работы	Скорость автомобиля, км/ч	Ускорение, м/с ²	Время работы на режиме	Общее время
Холостой ход	—	—	11	11
Разгон	0...15	1,04	4	15
Постоянная скорость	15	—	8	23
Замедление	15...10	-0,69	2	25
Замедление	10...0	-0,92	3	28
Холостой ход	—	—	21	49
Разгон	0...15	0,83	5	54
Смена передач	—	—	2	56
Разгон	15...32	0,94	5	61
Постоянная скорость	32	—	24	85
Замедление	32...10	-0,75	8	93
Замедление	0...10	-0,92	3	96
Холостой ход	—	—	21	117
Разгон	0...15	0,83	5	122
Смена передач	—	—	2	124
Разгон	15...35	0,62	9	133
Смена передач	—	—	2	135
Разгон	35...50	0,52	8	143
Постоянная скорость	50	—	12	155
Замедление	50...35	-0,52	8	163
Постоянная скорость	35	—	13	176
Смена передач	—	—	2	178
Замедление	35...10	-0,86	7	185
Замедление	10...0	-0,92	3	188
Холостой ход	—	—	7	195

При испытаниях 2-го типа определяется только выброс окиси углерода на холостом ходу. Пробы газа берут из выхлопной трубы зондом, вводимым на глубину 600мм. По стандарту содержание СО не должно превышать ... % по объему.

Испытания 3-го типа проводят с целью определения выброса углеводородов из картера двигателя. Выброс C_nH_m не

должен превышать $0,15\%$ массы топлива, расходуемого при испытаниях.

Стандарт оговаривает внешние условия проведения испытаний, точность, предъявляемую к измерительной аппаратуре.

При имитации ездового цикла допуск на скорость составляет $\pm 1 \text{ км/ч}$, а на время $\pm 0,5 \text{ с}$.

Необходимо отметить, что для автомобиля из серии или специально подготовленного стандарт устанавливает различные нормы выброса вредных веществ. Специально подготовленным считается транспортное средство, прошедшее подготовку в объеме мероприятий, не изменяющих конструкции двигателя и его регулировки, установленных техническими условиями завода-изготовителя.

В России и СНГ диагностическая оценка двигателей транспортных средств на токсичность ОГ осуществляется в соответствии с европейским испытательным циклом.

4.3.3. Усовершенствованный европейский цикл

В настоящее время в странах Европы применяется измененный (усовершенствованный) европейский ездовой цикл EU/ECE-Test Procedure (*EU Driving Cycle for ECE R 83/02 and 70/220/EEC; EUDC, Extra Urban Driving Cycle*), схема которого представлена на рис.4.5.

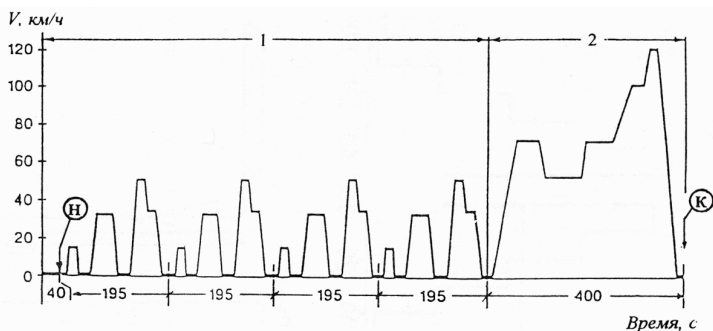


Рис. 4.5. Усовершенствованный европейский ездовой цикл (EUDC):

1 – городской цикл (City Cycle, ECE-Driving Cycle); 2 – EUDC

Н – начало отбора проб ОГ; К – конец отбора проб ОГ

Общая продолжительность цикла 1220с.

Расстояние, проходимое за весь цикл испытаний – 11,007 км.

Максимальная скорость транспортного средства – 120км/ч.

Средняя скорость транспортного средства – 33,6км/ч (44,0 км/ч без учета режимов х.х., который составляет 26,2%).

Цикл EUDC включает 4 этапа по 195с (стандартный городской цикл) и дополнительный этап в 400с, характеризующий интенсивную городскую езду.

Отбор проб ОГ начинается в *m.H* (начало) и заканчивается в *m.K* (конец).

В Европе для ограничения газообразных токсичных выбросов с ОГ ДВС утверждены *Правила 49 ЕЭК ООН* (Regulation 49, EEC R49). Основой их является стационарный цикл испытаний с такими же режимами, что и у 13-ступенчатого цикла испытаний США.

Для ограничения помутнения ОГ (черного дыма) дизелей имеет силу так называемый цикл *дымности* (Smoke Cycle) или *Правила 24 ЕЭК ООН* (Regulation 24, EEC R24).

4.3.4. Калифорнийский цикл

Принят в США для испытания транспортных средств (действует только в штате Калифорния).

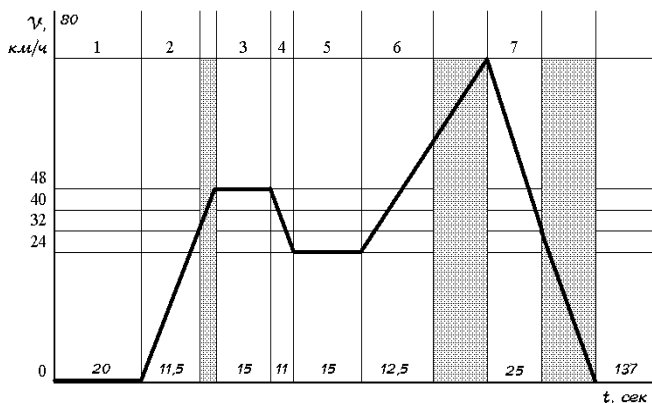


Рис. 4.6. Калифорнийский испытательный цикл

По сравнению с Европейским (рис 4.4), Калифорнийский цикл (рис.4.6) отличается более высокими интенсивностями ускорений и замедлений, которые удерживаются в течение длительного времени, т.е. воспроизводятся средние условия работы автомобиля при движении в городе. Повышенная интенсивность переходных процессов калифорнийского цикла приводит к повышенным выбросам токсичных веществ с ОГ, особенно C_nH_m .

Продолжительность испытаний по этому циклу (за исключением времени прогрева на режиме холостого хода) составляет 137с.

Цикл повторяется 7 раз. За конечный результат испытаний принимается сумма величин средних концентраций анализируемых компонентов ОГ, полученных в период первых 4-х циклов, уменьшенная на коэффициент 0,35, а также в период двух последних циклов, уменьшенная на 0,45.

Первые четыре цикла являются циклами прогрева двигателя и характеризуют выброс ОГ непрогретого двигателя.

Два последних цикла характеризуют выброс ОГ из двигателя с установившейся температурой.

4.3.5. Японские циклы

В Японии для испытания двигателя на токсичность используют испытательные циклы (рис.4.7):

- 10-ти ступенчатый (горячий);
- 11-ступенчатый (холодный);
- 15-ступенчатый (комбинированный).

Ездовой 10-ступенчатый цикл состоит из 10-ти последовательных режимов как установившихся (холостой ход, движение с постоянной скоростью 20 и 40км/ч), так и неустановившихся (интенсивные разгоны и замедления). Длительность одного цикла – 135с. Испытания проводят в течение 910с, повторяя ездовой цикл 6 раз, причем первый – для прогрева двигателя (без газового анализа ОГ), а последующие пять циклов – с отбором ОГ для газового анализа.

Испытания из холодного и горячего состояния проводятся отдельно. Испытания после холодного пуска начинаются после 25с работы на холостом ходу и имитируют пробег в 1,021км при

средней скорости движения $30,6\text{ км/ч}$ (максимальная скорость равна 60 км/ч). Испытания прогретого двигателя предшествует прогрев в течение 15 мин , а испытания проводят со средней скоростью $17,7\text{ км/ч}$ (максимальная скорость 40 км/ч) при имитации пробега в $0,664\text{ км}$.

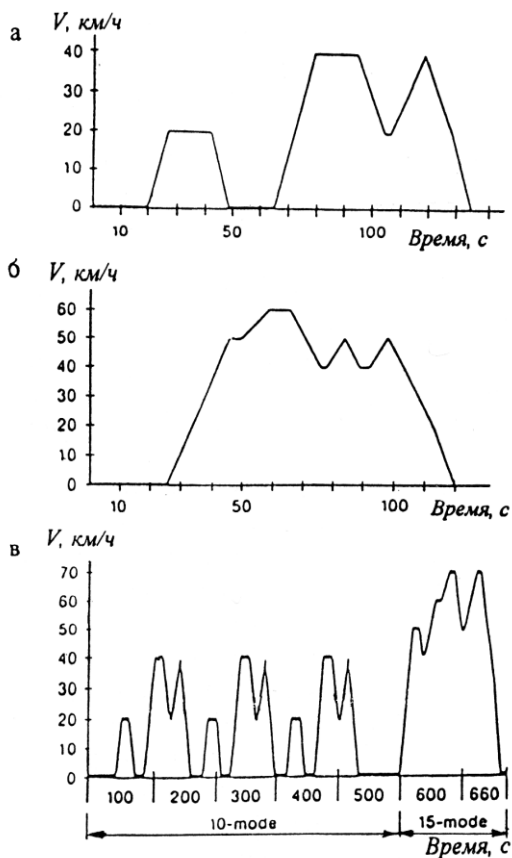


Рис. 4.7. Японские испытательные циклы:
а – 11-ступенчатый (холодный);
б – 10-ступенчатый (горячий);
в – 15-ступенчатый (комбинированный)

В Японии наравне с 10-ти режимным (ступенчатым) применяется 11-режимный цикл, отличающийся повышенными динамическими показателями испытательных режимов, следовательно, более приближенными по величине выбросов к условиям эксплуатации с возросшими интенсивностями движения на магистралях.

4.3.6. 13-ти ступенчатый цикл

Дизельные двигатели грузовых автомобилей испытывают на установившихся режимах, соответствующих режимам принятого в США и Европе единого испытательного 13-ти ступенчатого цикла (рис.4.8,а).

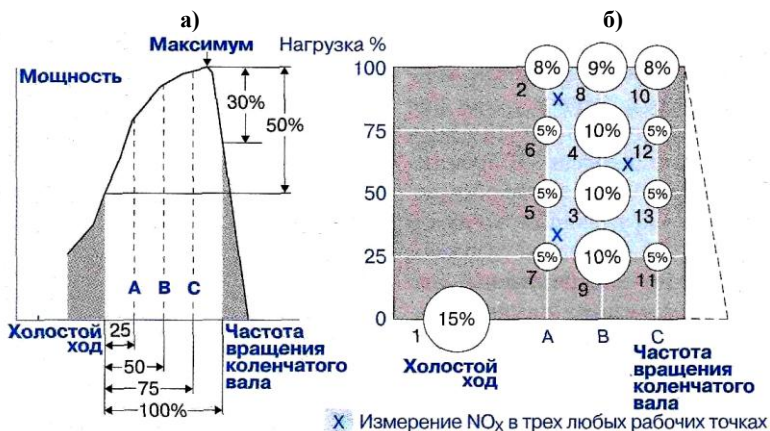


Рис. 4.8. Испытательный 13-ти ступенчатый цикл ECE R49 для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях (а) и 16 - ступенчатый цикл ESC (б)

Этот испытательный цикл включает 13 установившихся режимов:

1. три режима холостого хода с минимальной частотой вращения коленчатого вала,
2. пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100% нагрузки) при номинальной частоте вращения $n_{ном}$

3. пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100% нагрузки) при частоте вращения $n = 0,6 n_{ном}$ соответствующей максимальному крутящему моменту двигателя.

В конце каждого из режимов продолжительностью 10 минут определяются средние значения концентраций NO_x , CO , C_nH_m ОГ и эффективная мощность N_e .

Начиная с 2003 г, 13-ти ступенчатый цикл *ECE R49* заменён на цикл *ESC (European Steady State Cycle)*, в котором к 13-ти фиксированным режимам (рис. 3.8,б) добавлены еще

3 произвольных режима работы дизеля при его исследованиях на беговых барабанах.

Это позволяет исключить преднамеренное улучшение экологических показателей дизеля на 13-ти фиксированных режимах за счёт ухудшения этих показателей на других режимах. При сертификации на выполнение норм *EURO-3* изготовители могли выбрать либо испытательный *ESC*, либо испытательный цикл *ETC (European Transient Cycle)*, предусматривающий испытания двигателей на переходных режимах, имитирующих условия движения транспортного средства по городским, загородным дорогам и по автомагистрали.

Начиная с *EURO-4*, двигатели проходят сертификацию по обоим испытательным циклам.

При оценке токсичности по 13-ти ступенчатому испытательному циклу для каждого режима рассчитываются часовые массовые выбросы токсичных компонентов ОГ (E_{NO_x} , E_{CO} , $E_{C_nH_m}$).

Полученные значения вредных выбросов суммируются за весь цикл по каждому компоненту (с учетом коэффициентов K_i отражающих долю времени каждого режима), и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл определяются удельные выбросы вредных веществ по формулам:

$$e_{NO_x} = \sum_{i=1}^{13} (E_{NO_x} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot K_i);$$

$$e_{CO} = \sum_{i=1}^{13} (E_{CO} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot K_i);$$

$$e_{CH_x} = \sum_{i=1}^{13} (E_{CH_x} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot K_i);$$

Полученные значения удельных выбросов токсичных компонентов, отнесенные к единице вырабатываемой мощности, сравниваются с предельно допустимыми нормами по ГОСТ Р 41.49-2003 (см. табл. 4.2)

Таблица 4.2

Нормируемые значения выбросов токсичных компонентов

Обозначение строки	Начало действия, год	Масса, г/(кВт·ч)				Дымность, м ¹
		оксида углерода (CO)	углеводородов (HC)	оксидов азота (NO _x)	вредных частиц	
A	2004	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13 ¹⁾	0,8
B1 (Euro-4)	2005	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
B2 (Euro-5)	2008	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
C ²⁾	-	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
¹⁾ для двигателей рабочим объемом не менее 750 см ³ на цилиндр и частотой вращения при номинальной мощности не более 3000 мин ⁻¹ ²⁾ для транспортных средств EEV						

4.4. Переходный цикл ETC

Испытание *ETC*, представляющее собой посекундную последовательность переходных режимов.

График изменения параметров двигателя по времени цикла представлен на рис.4.10.

Испытания выполняют на двигателе, установленном на испытательном стенде и соединенном с динамометром.

В процессе выполнения на прогревом двигателе предписанного переходного цикла, основанного на воспроизведении осо-

бенностей эксплуатационных режимов работы мощных двигателей, устанавливаемых на грузовые автомобили и автобусы, вышеупомянутые выбросы вредных веществ определяют после разбавления всего количества отработавших газов кондиционированным атмосферным воздухом. С помощью сигналов обратной связи, отслеживающих значения крутящего момента и частоты вращения и поступающих с динамометра, необходимо проинтегрировать мощность по времени цикла и в результате получить работу, выполненную двигателем в течение цикла.

Концентрации NO_x и C_nH_m за цикл определяют интегрированием сигнала, поступающего от анализатора.

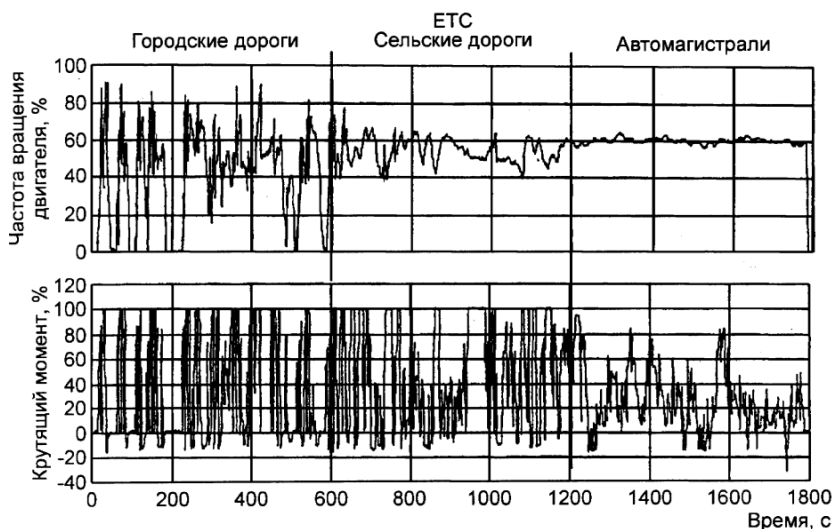


Рис.4.10. Переходный цикл ЕТС (The Transient Cycle)
(ГОСТ Р41.49-2003 и R49)

Концентрации CO , CO_2 и $NMHC$ могут быть определены путем интегрирования сигнала, поступающего от анализатора, или использования процедуры накопления пробы в резервуаре. Для вредных частиц соответствующие количества проб собирают на подходящих для этой цели фильтрах. Расход разбавленных отработавших газов определяют за цикл, что позволяет рассчитать значения масс выбросов вредных веществ. Массу каж-

дого вредного вещества в выбросах следует отнести к работе, выполненной двигателем, для того чтобы получить в результате массы всех вредных веществ, выраженные в граммах на кило- ватт-час [$г/(кВт·ч)$]

4.5. Испытательный цикл ELR

Испытание ELR, состоящее из последовательных ступенчатых изменений нагрузки при различных частотах вращения, являющихся составными частями единой процедуры испытания и выполняемых одновременно.

График изменения параметров двигателя по времени цикла представлен на рис.4.11.

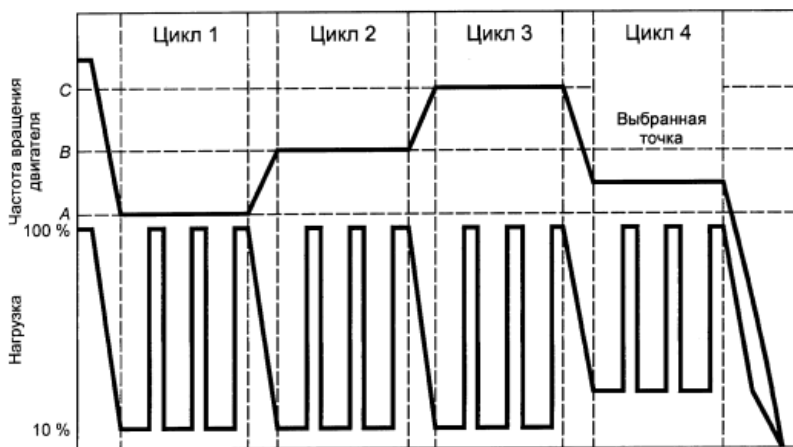


Рис. 4.11. Испытание дизеля для оценки токсичности

(ГОСТ Р41.49-2003 и R49)

П р и м е ч а н и е — Дополнительный нагрузочный режим выбирают с использованием санкционированных статистических методов рандомизации.

В процессе испытания, цель которого — определить реакцию двигателя на предписанную нагрузку, дымность прогретого двигателя определяют с помощью дымомера.

Испытание заключается в последовательном повышении нагрузки на двигатель начиная с 10 % вплоть до 100 % при *трех* различных частотах вращения двигателя.

Кроме того, необходимо дополнительно испытать двигатель в *четвертом нагрузочном режиме, выбранном органом по сертификации*, и сравнить измеренные значения со значениями, полученными на ранее использованных ступенях нагрузки.

Пиковое значение дымности определяют, используя алгоритм усреднения, описанный в *дополнении 1* к ГОСТ Р41.49-2003.

4.6. Оценка токсичности автомобиля

При испытаниях автомобиля в соответствии с испытательными циклами можно оценить общую токсичность автомобиля, сопоставляя полученные величины выброса токсичных веществ с установленными нормами.

Для исследования влияния параметров процесса сгорания, его конструкции, системы подачи топлива, способов ограничения выбросов и т.д. на токсичность двигателя, необходимо оценить изменения токсичности ОГ на отдельных конкретных режимах работы двигателя.

Подобная оценка осуществляется на основании снятия скоростных, нагрузочных и регулировочных характеристик двигателя. Концентрация отдельных токсичных веществ в ОГ оценивается по:

- объемному содержанию (в процентах или частицах на миллион (*ч/мл*));
- по выбросам токсичных веществ на единицу мощности в час (*г/л.с.ч.*, *г/кВт·ч*).

Степень загрязнения атмосферы токсичными выбросами *зависит от их концентрации в ОГ и интенсивности выхода ОГ*.

Количество и состав ОГ непрерывно изменяются в зависимости от режимов работы двигателя. Так, например, концентрация *СО* при работе двигателя на *Х.Х.* является значительной, но общее количество выделенных ОГ невелико, и наоборот, при работе двигателя с полной нагрузкой концентрация *СО* не столь значительна, но её суммарное количество в несколько раз превышает выброс данного компонента на холостом ходу.

Массу любого токсичного компонента, выделяемого в единицу времени (кг/ч) можно вычислить, зная объёмную концентрацию данного компонента в ОГ.

Весовое содержание i -го компонента, определяемое на основании данных о его концентрации, выражается уравнением:

$$G_i = c_i \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_s} \cdot G_s, [\text{кг/час}];$$

где $G_s = G_{\text{возд}} + G_T$, [кг/м³] – количество ОГ, выделяемых в единицу времени.

C_i – концентрация i -го компонента в ОГ (% по объёму);

γ_i – плотность i -го компонента, [кг/м³];

γ_s – плотность ОГ, [кг/м³].

Часовой расход воздуха $G_{\text{возд}}$ можно измерить с помощью расходомера или определить по формуле:

$$G_{\text{возд}} = a \cdot l_0 \cdot G_T [\text{кг/час}],$$

где G_T – расход топлива.

Удельная массовая интенсивность выброса i -го компонента определяется по формуле:

$$g_i = G_i / N_e [\text{г/кВт} \cdot \text{ч}],$$

где G_i – весовое содержание i -го компонента,

N_e – эффективная мощность двигателя.

4.7. Показатели качества воздуха

Всемирной организацией здравоохранения при ООН в 1963г. рекомендовано определение критерия чистоты воздуха (ПДК – предельно допустимая концентрация вредного вещества) по четырем уровням:

1-й уровень – невозможно обнаружить прямое или косвенное влияние на человека, животных и растительность;

2-ой уровень – возможно раздражение органов чувств, вредное воздействие на растительность, уменьшение прозрачности атмосферного воздуха;

3-й уровень – нарушение жизненно важных физиологических функций и возникновение хронических заболеваний у человека и животных;

4-ый уровень – возникновение острых заболеваний и гибель людей и животных.

В качестве основного показателя *ПДК* принимается массовая концентрация примеси, определяемая исключительно по условиям воздействия на человеческий организм. Главной санитарной инспекцией РФ *ПДК* утверждаются «на уровне дыхания человека», чтобы вредные вещества не оказывали на человека прямого или косвенного влияния и не снижали его работоспособности.

При этом учитывается воздействие, как отдельной примеси, так и суммарное воздействие нескольких примесей. В случае одновременного присутствия в атмосфере n вредных веществ одинаправленного действия (с концентрациями $g_1, g_2, g_3, g_4, \dots$) их суммарная концентрация не должна превышать единицы при расчете по формуле:

$$Q = \frac{q_1}{ПДК_1} + \frac{q_2}{ПДК_2} + \frac{q_3}{ПДК_3} + \dots + \frac{q_n}{ПДК_n} < 1$$

Для того, чтобы сравнить между собой токсичность разных веществ, а также определить долю, вносимую каждым токсичным компонентом в общую токсичность смеси газов, суммарную токсичность относят к эталону – наиболее изученному компоненту *ОГ*, например, оксиду углерода и определяют по уравнению:

$$C_{CO} = \sum_{i=1}^n \frac{ПДК_{CO}}{ПДК_i} \cdot C_i, \quad \text{- относительная токсичность компо-}$$

нента,

где $ПДК_{CO}$ - значение *ПДК* для окиси углерода,

$ПДК_i$ - значение *ПДК* для определяемого (i -го) компонента *ОГ* (например, для сажи);

C_i - концентрация определяемого (i -го) компонента *ОГ* (например, сажи);

По степени воздействия на организм человека вредные вещества в соответствии с ГОСТ 12.1.007-88 подразделяют на четыре класса опасности:

- 1-й – чрезвычайно опасные;
- 2-й – высоко опасные;
- 3-й – умеренно опасные;

4-й – мало опасные.

Класс опасности вредных веществ устанавливается в зависимости от норм и предельно-допустимых концентраций (ПДК), устанавливаемых в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 (табл.4.3).

Таблица 4.3

Класс опасности вредных веществ

Наименование показателей	Нормы для класса опасности			
	1	2	3	4
ПДК ВВ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1...1,0	1,1...10,0	Более 10,0
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500...5000	5001...50000	Более 50000

За рубежом определяющими степень пригодности воздуха для человека являются МДК – максимально допустимые концентрации ВВ в воздухе.

ПДК и МДК нормируются государством. Для населенных пунктов различают среднесуточные (за 24 ч.) и максимально разовые (за 30 мин) значения ПДК. Первые значения являются основными, а вторые устанавливают для соединений, обладающих резким запахом и раздражительным действием (табл.4.4).

В соответствии с санитарными нормами в атмосферном воздухе населенных пунктов России содержание вредных веществ не должно превышать ПДК, приведенных в табл.4.4.

Таблица 4.4

ПДК некоторых вредных веществ

Токсичные вещества	ПДК, мг/м ³	
	Максимально разовая	Среднесуточная
Диоксид азота	0,085	0,085
Аммиак	02	0,2
Сажа (копоть)	015	0,05
Диоксид серы	05	0,05
Сероводород	0,008	0,008
Оксид углерода	3,0	1,
Акролеин	0,03	0,1
Бензин (нефтяной, в пересчете на С)	5,0	1,5
Пыль нетоксичная	0,5	0,15
Соединения свинца (в пересчете на Pb)	—	0,0007
Этанол	0,01...3,0	0,01...5,0

Санитарные нормы (ПДК) регламентируют содержание вредных веществ в атмосферном воздухе и воздухе рабочего места. При этом рабочим местом (зоной) считается пространство, ограниченное по высоте 2 м над уровнем пола или площадки, на котором работающий находится большую часть своего рабочего времени (более 50% или более 2 ч непрерывно).

ПДК – концентрации, которые не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья человека, обнаруживаемые современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений (ГОСТ 12.1.005-88).

В табл. 4.5 указан возможный состав основных вредных компонентов в ОГ дизелей и их воздействие на организм человека (в скобках приведено допустимое содержание примесей в атмосферном воздухе населенных пунктов).

Таблица 4.5

Состав вредных выбросов ОГ дизелей

Примеси	Содержание примесей, %	Воздействие на человека при содержании примесей в воздухе, %
Оксид углерода CO	0,005...0,5 (0,0008)	0,01 – отравление при длительном пребывании 0,05 – отравление через 1 час 1,0 – потеря сознания после нескольких вдохов
Оксиды азота NO , NO_2 , N_2O_4 и др.	0,004...0,2 (0,000 009)	0,0001...0,0003 – восприятие запаха 0,0013 – раздражение слизистых оболочек 0,004...0,008 – отек легких
Диоксид серы SO_2	0,003...0,05 (0,000 012)	0,0017 – раздражение слизистых оболочек 0,01 – отравление через 1 мин
Акролеин – альдегид акриловой кислоты $CH_2=CHCHO$	0,001...0,004 (0,0008)	0,0005 – трудно переносимо 0,014 – летальный исход через 10 мин
Формальдегид $HCHO$	4...7 $см^3/м^3$ (0,00001)	0,007 – раздражение слизистых оболочек 0,018 – осложнения
Углеводороды C_nH_m	0013...0,047	Раздражение слизистых оболочек Образование смога в соединении с оксидами азота
Сажа (ТЧ) и несгоревшее топливо	001...0,5 $мг/л$ (0,000 038)	Загрязнение воздуха и воды, ухудшение видимости

4.8. Условная суммарная токсичность отработавших газов автомобиля

Если в ОГ содержится $x\%$ CO , $y\%$ NO_x и $z\%$ C_nH_m , причем известно, что токсичность NO_x в 10 раз выше, а токсичность C_nH_m в 1,5 раза ниже, чем токсичность CO , то общая токсичность может быть приравнена к содержанию в них CO в количестве $(x + 10y + 0,67z)\%$.

Изменение суммарной токсичности бензинового двигателя от состава смеси и относительных значений в ней отдельных компонентов представлено на рис.4.10.

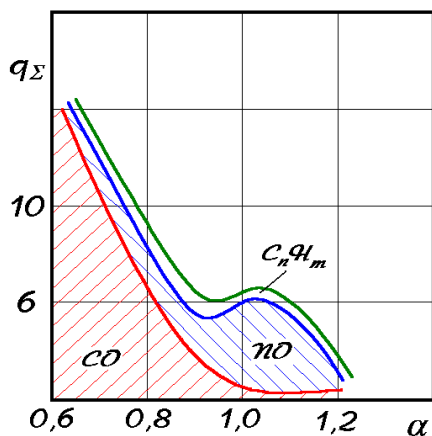


Рис. 4.10. Суммарная токсичность отработавших газов

При значениях $\alpha < 0,85$ токсичность в основном определяется содержанием CO .

При $\alpha > 1,0$ - токсичность определяется содержанием NO_x .

При $\alpha = 0,90 \div 0,95$ - значение CO и NO_x в общей токсичности примерно одинаково. Влияние их очень мало.

На режимах сильного дросселирования удельный вес C_nH_m в общей токсичности ОГ существенно возрастает, при наличии в них альдегидов и кетонов. Одновременно с этим токсичность NO_x снижается вследствие уменьшения температуры.

Токсичность дизелей при работе на средних нагрузках практически определяется NO_x . На больших нагрузках к ним добавляется сажа. На малых нагрузках NO_x уменьшается, но зато увеличивается C_nH_m . При использовании в качестве топлива в ДВС искрового зажигания сжиженных газов (смесей пропана и бутана) общая токсичность ОГ существенно уменьшается.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Назовите основные методы отбора газовых проб для оценки выброса ВВ с ОГ.
2. Объясните сущность метода непрерывного отбора газа с измерением общего количества.
3. Объясните сущность метода непрерывного отбора газа с разбавлением его воздухом (метода CVS – Constant Volume Sampling).
4. В каких единицах выражается концентрация ВВ в ОГ?
5. Назовите основные методы испытаний с целью определения выбросов ВВ и дымности ОГ.
6. Объясните порядок проведения испытаний по циклам:
 - Федеральный цикл FTP-75
 - Европейский испытательный цикл
 - Усовершенствованный европейский цикл
 - Калифорнийский цикл
 - Японские циклы
 - 13-ти ступенчатый цикл
 - Переходный тест ETC
 - Испытательный цикл ELR
7. По каким параметрам производится оценка токсичности двигателя?
8. Назовите показатели качества воздуха.
9. Что представляет собой условная суммарная токсичность ОГ ДВС?

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЯ

5.1. Методы оценки токсичности газовых проб

При испытании и диагностировании двигателей количество выбросов вредных веществ с ОГ определяется при помощи специальных приборов – *газоанализаторов*, различных по принципу работы и конструктивному исполнению.

Газоанализатор – это прибор для непосредственного измерения количества выбросов вредных веществ (например, CO , C_nH_m , NO_x и др.) в пробе ОГ (*количественный анализ*) или определения примеси в газовой смеси (*качественный анализ*).

Газоанализаторы различают в зависимости от:

- 1) времени установления выходного сигнала на:
 - быстродействующие;
 - малоинерционные;
 - инерционные, с большой инерционностью;
 - медленно действующие.
- 2) принципа действия (метода анализа) на:
 - тепловые;
 - магнитные;
 - электрохимические;
 - ионизационные;
 - оптические;
 - полупроводниковые;
 - хемилюминесцентные;
 - флуоресцентные;
 - комбинированные (терромагнитные, пламенно-ионизационные, оптико-акустические и др.).
- 3) числа измеряемых компонентов газовой смеси:
 - одно;
 - многоканальные.
- 4) условия применения:
 - стационарные (установленные в помещении);
 - транспортируемые (установленные в передвижных лабораториях);

– переносные (предназначенные для работы на открытом воздухе).

5) режима работы:

- непрерывного;
- циклического (прерывистого) действия.

В зависимости от метода анализа наибольшее применение нашли следующие газоанализаторы:

- *химические*, определяющие компоненты ОГ путем поглощения этих компонентов каким-либо веществом (химическим реактивом), вступающим в химическое соединение с данным компонентом;
- *физико-химические* газоанализаторы (методы анализа) базируются на различных химических реакциях, сопровождающихся тем или иным физическим явлением;
- *физические* газоанализаторы для анализа используют какое-либо физическое свойство определяемых компонентов ОГ, заметно отличающееся от этого же свойства остальных составляющих газа.

Первые два метода анализа ОГ обычно применяют в стационарных газоанализаторах с использованием как непрерывного, так и периодического разового отбора пробы газа.

5.2. Хроматографический анализ

Это метод разделения и идентификации компонентов газовой смеси. Устройство и принципы работы газового хроматографа. В схему любого газового хроматографа (рис. 5.1) входят: 1 – баллон с газом-носителем (азотом или гелием), 2 – блок подготовки газа-носителя, 3 – дозатор (испаритель), 4 – колонка, 5 – термостаты испарителя и колонки, 6 – детектор, 7 – регистрирующая аппаратура (самописец, интерфейс и т.п.).

Подготовка газа-носителя подразумевает его очистку от микропримесей. Одновременно устанавливают необходимые значения давления газа и скорости его движения через колонку. Точно измеренный объем жидкой (или, реже, газообразной) пробы быстро вводят в поток газа с помощью шприца, прокалывая им резиновую прокладку и отмечая момент ввода пробы в испаритель. Другой способ ввода - использование специальных

кранов-дозаторов. Обычно объем жидкой пробы – от 0,5 до 10 мкл.

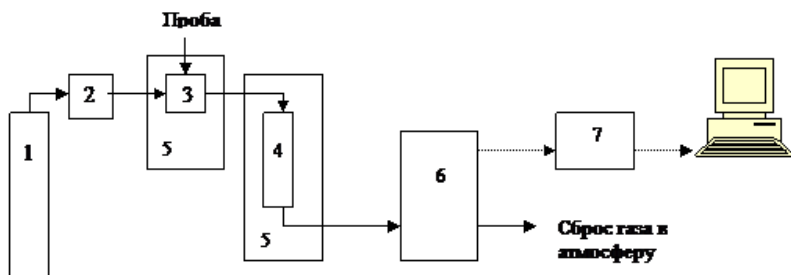


Рис. 5.1. Схема газового хроматографа:

1 – баллон с газом-носителем (азотом или гелием), 2 – блок подготовки газа-носителя, 3 – дозатор (испаритель), 4 – колонка, 5 – термостаты испарителя и колонки, 6 – детектор, 7 – регистрирующая аппаратура (самописец, интерфейс и т.п.).

Сплошными линиями показано движение газа, пунктиром – передача электрического сигнала.

В испарителе создается температура, намного более высокая, чем температура кипения наименее летучего компонента пробы. После испарения компоненты пробы попадают в хроматографическую колонку. Колонки изготавливают из инертных материалов (медь, сталь, стекло, кварц).

Колонки могут быть *насадочными* или *капиллярными*.

Насадочные колонки изогнуты в виде U-образной трубки или спирали, они сравнительно короткие (до 6м) и широкие (внутренний диаметр – менее 1см). Внутри насадочной колонки находится мелкодисперсный сорбент (носитель с нанесенной на его поверхность НЖФ).

Капиллярные колонки имеют гораздо большую длину (до 500м, обычно 50 – 100м) и меньший диаметр (1 – 2 мм), чем насадочные. Такие колонки являются гибкими, и их наматывают на специальные катушки. НЖФ наносят на внутренние стенки капиллярной колонки.

Процесс разделения исследуемого газа показан на рис. 5.2.

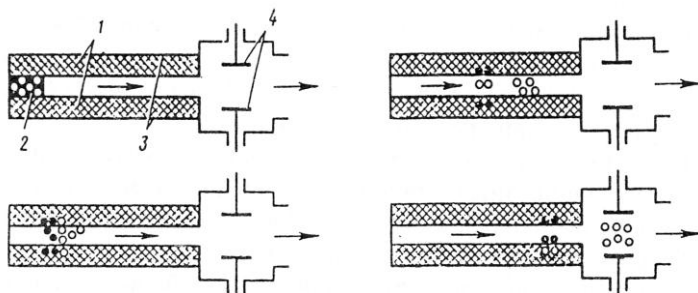


Рис. 5.2. Процесс разделения исследуемого газа
 1 – сорбент; 2 – газ-носитель; 3 – капиллярная колонка;
 4 – детектор

Газ-носитель 2 проходит через капиллярную колонку 3, на внутренних сторонах которой осажден сорбент 1 (разделяющая жидкость). Адсорбенты – вещества, на которых происходит адсорбция поглощаемых смесей из газовых растворов.

Исследуемая порция ОГ вводится в колонку вместе с газом-носителем. При прохождении через колонку компоненты газовой смеси поглощаются и удерживаются сорбентом. Так как скорость растворения отдельных компонентов различна, то один из компонентов переходит в растворитель (поглощается и удерживается сорбентом) в большем количестве. Детектор 4 регистрирует полосы компонентов смеси в виде сигналов в функции времени, т.е. прибор записывает хроматограмму (см. рис. 5.3),

Для набивки колонки адсорбентом (заполнителем) используют активированный уголь, силикагель, алюмогель, глинозем и др. природные материалы. В качестве сорбентов применяют жидкий парафин, высшие многогидроокисные (большое количество *ОН*-групп) спирты (глицерин, силиконовые масла и др.), а в качестве газов-носителей чаще всего – H_2 , N_2 , CO_2 , воздух, гелий и др. газы.

Недостатками газовой хроматографии являются *неоперативность* получения информации, невозможность оценки динамики процессов, необходимость дискретного отбора и хранения проб.

Преимущества метода – возможность оценить с большой точностью и чувствительностью значительно большее количе-

ство соединений, входящих в состав ОГ; определить содержание C_nH_m в ОГ по отдельным компонентам, а не по их общей сумме.

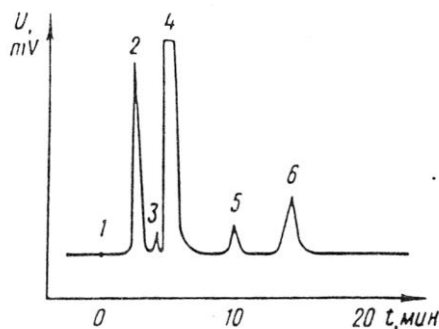


Рис. 5.3. Вид хроматограммы:

1 – начало; 2 – водород; 3 – кислород;
4 – азот; 5 – метан; 6 – оксид углерода

5.3. Оптические газоанализаторы

Наибольшее распространение при диагностировании транспортных средств находят физические методы, одним из которых является оптический.

Оптические газоанализаторы определяют концентрации вредного компонента в ОГ по изменению показателя преломления, оптической плотности, спектрального поглощения или излучения и др. свойств газовой смеси.

В основе определения компонентов ОГ при помощи оптических газоанализаторов используется метод измерения избирательного поглощения лучистой энергии в инфракрасной (ИК), ультрафиолетовой (УФ) или видимой областях спектра, т.е. поглощения излучения волны определенной длины. На рис. 5.4 показаны спектры поглощения некоторых газов в ИК области.

Для определения концентрации анализируемого компонента ОГ из всего спектра поглощения излучения выбирается одна или несколько наиболее интенсивных полос (рис. 5.4.): например, для CO – полоса с волной $4,7 \text{ мкм}$, для CO_2 – $2,7$ и $4,3$, для метана – $3,3$ и $7,65$, для C_nH_m – $3,45$, для C – $3,95 \text{ мкм}$ и т.д.

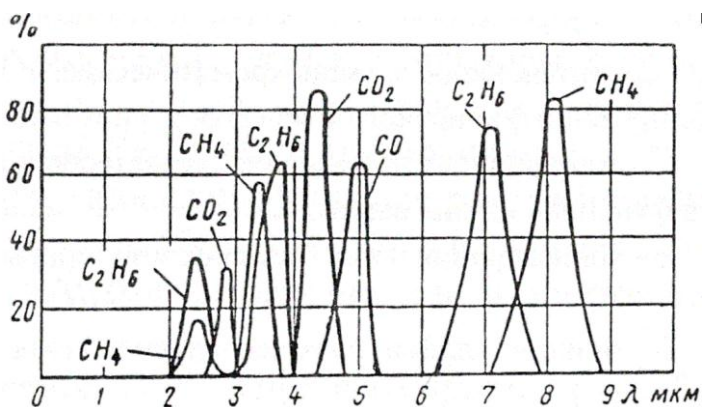


Рис. 5.4. Спектры поглощения некоторых газов в ИК области

На рис. 5.5 показана схема измерения токсичных составляющих ОГ. ИК-излучение от источника света 1 и рефлектора 2 поступает в отделенные одна от другой камеры (кюветы) 3 и 4, из которых сравнительная 3 заполнена чистым атмосферным воздухом или инертным газом (обычно азотом), а измерительная 4 – отработавшими газами. Затем ИК-излучение через обтюратор² 5 при помощи рефлектора 2 попадает на детектор 6.

При прохождении потока ИК-излучения через измерительную (рабочую) камеру происходит его ослабление за счет поглощения соответствующей части спектра определяемым ком-

² **обтюратор** (франц. obturateur, от лат. obturo - закрываю) в киноаппарате, устройство для периодического перекрывания света, проходящего к кадровому окну киноаппарата, во время перемещения киноплёнки скачковым механизмом. Применяются вращающиеся дисковые, конические и цилиндрические обтюраторы, а также шторные, совершающие возвратно-поступательное движение. Обтюраторы всех разновидностей имеют световые вырезы (секторные, прямоугольные и др. форм), через которые свет проходит к экспонируемому фотослою киноплёнки (в съёмочном киноаппарате) или к проецируемому кадру кинофильма (в проекционном киноаппарате). Угловой размер рабочей лопасти обтюратора выбирается таким, чтобы обтюратор перекрывал световые лучи в течение времени, необходимого для смены кадров. Частота вращения обтюратора должна соответствовать частоте киносъёмки или кинопроекции. Обтюраторы применяют также и в др. оптико-механических и фотоэлектрических приборах, например, при модуляции света.

понентом ОГ. В сравнительной камере, заполненной азотом, поглощение излучения не происходит. Степень поглощения излучения, характеризующая содержание вредного компонента в ОГ, определяется детектором.

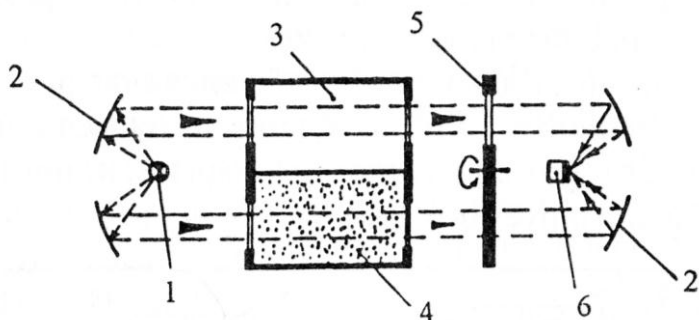


Рис. 5.5. Схема измерения компонентов ОГ:
 1 – источник света; 2 – рефлектор; 3 – сравнительная кювета;
 4 – измерительная кювета; 5 – obturator; 6 – детектор

Газоанализаторы, используемые для анализа ОГ, делятся на дисперсные (дисперсионные) и недисперсионные.

Недисперсионные (NDIR) ИК-анализаторы обычно снабжены фильтрующими камерами (или фильтрами), обеспечивающими селективность (избирательность) газоанализатора в отношении определяемого компонента. *NDIR*-анализаторы получили более широкое применение, так как они проще по конструктивному исполнению, надежнее и дешевле дисперсионных.

Дисперсионные газоанализаторы для разложения пучка света с целью получения монохроматического излучения оборудуются специальными призмами, решетками или интерференционными фильтрами.

5.4. Оптико-акустические газоанализаторы

Оптико-акустические газоанализаторы находят широкое применение при анализе ОГ двигателей для измерения CO и C_nH_m . Механизм определения компонентов ОГ в данных приборах основан на использовании явления нагрева газа при погло-

щении излучения и охлаждении его, когда действие, например ИК-излучения, прекращается.

Схема опико-акустического газоанализатора представлена на рис. 5.6.

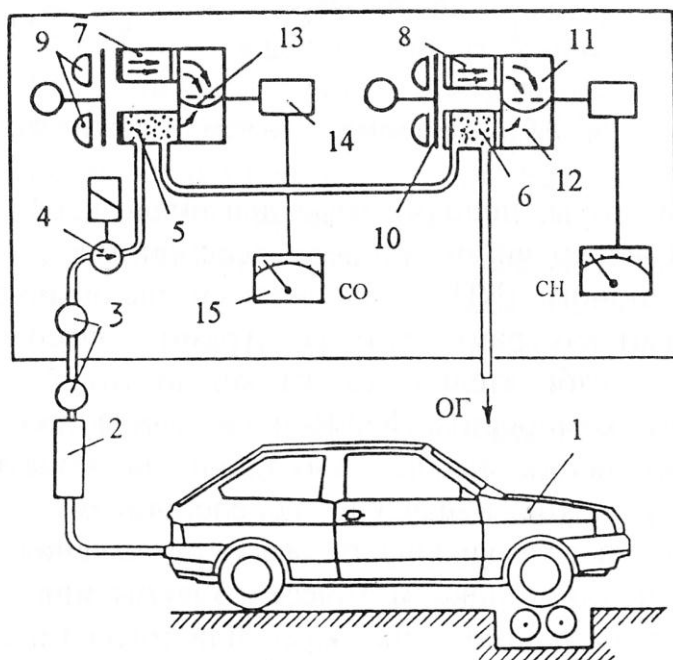


Рис. 5.6. Схема опико-акустического газоанализатора

Испытуемый газ из выхлопной трубы автомобиля 1 после очистки в фильтрах 2 и 3 при помощи насоса 4 поступает в измерительные камеры 5 и 6. Камеры сравнения 7 и 8 заполнены инертным газом. ИК-излучение от источников 9 проходит через камеры в виде импульсов с некоторой частотой, которая обеспечивается при помощи обтюлятора 10. В результате прерывания ИК-излучения в приемниках (замкнутых объемах) 11 и 12 газ будет периодически нагреваться и охлаждаться: возникнут колебания температуры и, как результат, давление газа, разное для измерительной и сравнительной камер. Частота пульсаций давления газа зависит от частоты прерывания (обычно порядка 6

Гц), а мощность пульсаций (сила звука) – от мощности потока лучистой энергии и поглотительной способности анализируемого газа.

В средней части приемников размещен конденсаторный микрофон (мембрана) 13, подключенный к усилителю 14. Мембрана, которая является элементом конденсаторного микрофона, воспринимает колебания давления как с одной, так и с другой стороны и начинает колебаться. При этом амплитуда колебаний мембраны определяется разностью давлений в нижнем и верхнем объемах приёмника и зависит от интенсивности поглощения *ИК*-излучения определяемым компонентом ОГ.

В результате колебания мембраны меняется ёмкость конденсатора. Соответствующие изменения ёмкости конденсатора преобразуются на выходе усилителя 14 в ток, который характеризует поглощение *ИК*-излучения в рабочей камере. Изменение сигнала, фиксируемое стрелочным или цифровым индикатором 15, является мерой концентрации определяемого токсичного компонента ОГ.

Оптические системы газоанализаторов с ультрафиолетовым (*УФ*) излучателем идентичны приборам *ИК*-излучения. Различие состоит в конструктивных особенностях отдельных деталей.

5.5. Пламенно-ионизационные газоанализаторы (fid)

Действие пламенно-ионизационного детектора основано на измерении ионного (ионизационного) тока в водородном пламени при сжигании в нём C_nH_m .

При сжигании чистого водорода пламя не создает ионного тока, но при наличии даже незначительных загрязнений (например, C_nH_m) в водородном пламени возникает ионный ток, величина которого пропорциональна числу атомов углерода, содержащихся в молекуле C_nH_m .

Схема такого прибора представлена на рис. 5.7.

В поверхностно-ионизационных газоанализаторах образуются положительные ионы при адсорбции газов на нагретых поверхностях металлов или их оксидов. Ионизоваться могут компоненты с достаточно низкими потенциалами ионизации, сравнимыми по величине с работой выхода электронов из

нагретой поверхности (эмиттера). В качестве эмиттеров применяют, например, нагреваемые током спирали из Pt , оксидов Mo или W . Нагретый эмиттер (горелка 2) одновременно служит одним из электродов ионизационной камеры 1. Второй ("коллекторный") электрод 3 выполняют в виде наружного цилиндра. Температуру нагрева эмиттера изменяют, от 350 до 850 °С.

Регистрируется величина ионизационного тока в пламени горелки позволяющая судить о концентрации C_nH_m в отработавших газах.

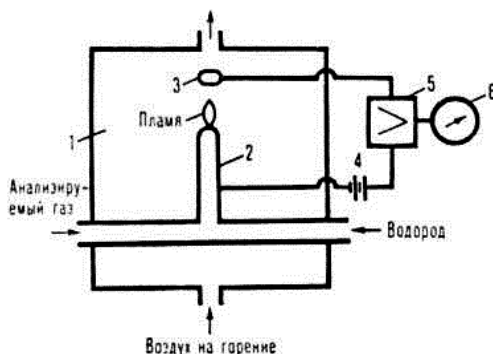


Рис. 5.7. Пламенно - ионизационный газоанализатор:
 1-ионизац. камера; 2-горелка; 3-коллекторный электрод;
 4-источник напряжения; 5-усилитель; 6-вторичный прибор

5.6. Хемилюминесцентные газоанализаторы (cld)

Хемилюминесцентные газоанализаторы применяют в основном для измерения содержания NO и NO_x .

Схема хемилюминесцентного газоанализатора показана на рис. 5.8.

Проба ОГ после очистки поступает в реакционную камеру 1, в которую также подают озон (O_3) из озонатора 2. При этом в реакционной камере происходит химическая реакция между озоном и оксидом азота, сопровождаемая световым излучением – хемилюминесценцией, которое регистрируется фотоэлектронным умножителем 3. Сигнал от умножителя поступает на вход усилителя 4, после чего подается на индикатор 5. Озон в озонаторе создается с помощью электрического

разряда при подаче на озонатор импульсов напряжения (порядка 10 кВ) от источника высокого напряжения 6.

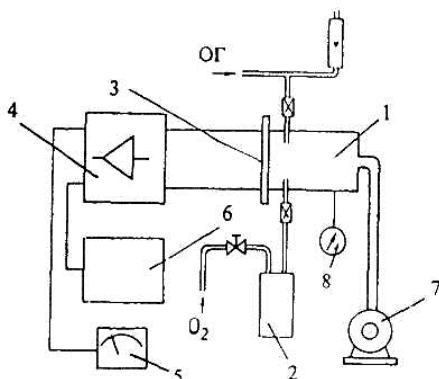


Рис. 5.8. Схема хемилюминесцентного газоанализатора

Пробы ОГ в реакционную камеру подаются насосом 7, а давление контролируется вакуумным манометром 8.

Хемилюминесцентные газоанализаторы должны иметь нагреваемый газотворник для предотвращения конденсации водяного пара внутри газового тракта.

5.7. Термокондуктометрические газоанализаторы

В основе работы используют зависимость электрического сопротивления проводника с большим температурным коэффициентом сопротивления (см. рис. 5.9.), помещенного в камеру с анализируемой газовой смесью и нагреваемого электрическим током, от теплопроводности газовой смеси, окружающей проводник.

Если камеру, в которой имеется нагреваемая электрическим током нить, заполнить, например, углекислым газом, то температура нити в ней окажется выше, чем температура нити в воздушной среде при тех же условиях. Это происходит из-за того, что теплопроводность CO_2 меньше теплопроводности воздуха ($\lambda_{возд} > \lambda_{CO_2}$). Процентное содержание CO_2 можно определить, сравнивая температуру нити в камере, заполненной исследуемым газом, с температурой нити в другой (подобной) камере, заполненной воздухом.

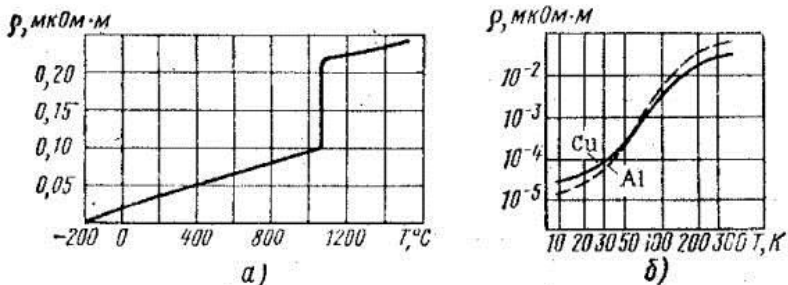


Рис. 5.9. Зависимости удельного сопротивления от температуры в широком интервале температур:
(а) – для меди; (б) – для алюминия

5.8. Оборудование, используемое для испытаний автомобильных дизелей на дымность отработавших газов

Испытания дизелей на дымность осуществляются как в виде дополнительной процедуры, так и во время проведения регулярных техосмотров автомобилей. Для этой цели применяются два стандартизованных метода. По первому методу определенное количество отработавшего газа пропускается через фильтрующий элемент. Степень обесцвечивания фильтра характеризует содержание сажи в отработавших газах. Абсорбционный метод (испытание на непрозрачность или потемнение газа) основан на определении снижения яркости луча света, пропускаемого через отработавшие газы. Определение дымности отработавших газов дизелей должно осуществляться под нагрузкой. Здесь наиболее распространены два разных метода проведения испытаний: испытания при полной нагрузке, осуществляемые на испытательной трассе с торможением автомобиля; испытания при свободном ускорении с кратковременным нажатием на педаль газа; нагрузка при этом создается возвратно-поступательно перемещающимися и вращающимися массами самого двигателя, работающего в режиме ускорения.

5.8.1. Оптический метод. Дымомер фирмы «Хартридж»

Дымомер фирмы «Хартридж» работает по принципу определения оптической плотности обработавших газов при просвечивании их слоя источником света. Дымомеры «Хартридж» отвечают требованиям международного стандарта ISO/DIS 3173, EEC Directive 72/306 и ECE Regulation 24.

Принципиальная схема дымомера показана на рис. 5.10.

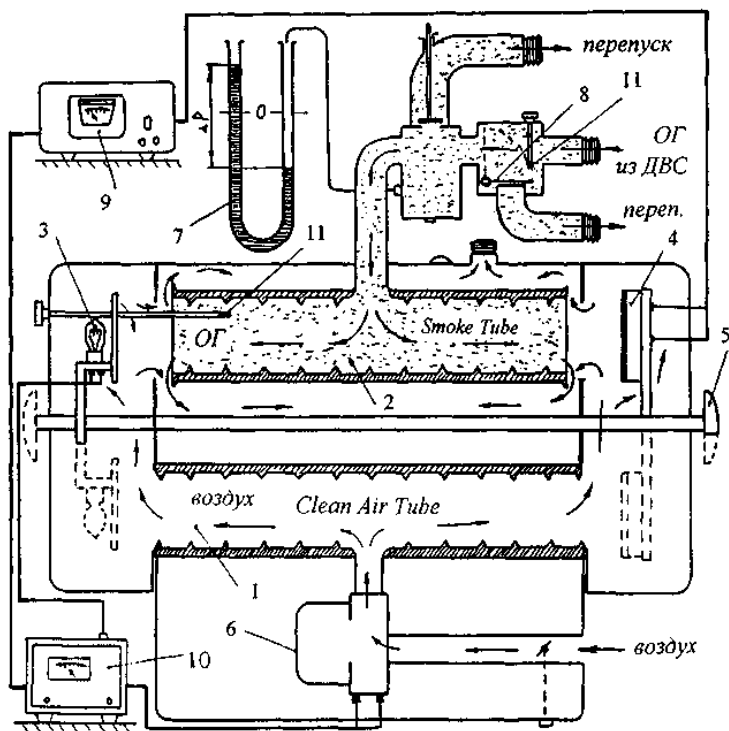


Рис. 5.10. Схема дымомера «Хартридж»

Дымомер содержит две одинаковые трубы (канала), в одну из которых (калибровочную) подают чистый воздух, а в другую (рабочую) – обработавшие газы.

С одной стороны трубы установлен источник света 3, а с другой - светоприемник (фотоэлемент) 4. Фотоэлемент соединен со стрелочным прибором 9 или через микросхему с цифровым дисплеем, а источник света с блоком питания 10. Источник света и фотоэлемент установлены на одной общей вращающейся оси таким образом, что по желанию могут быть размещены при помощи рукоятки 5 у концов как рабочей 2, так и сравнительной трубы 7. Во время замера дымности отработавших газов измеряющая система располагается у рабочей трубы, заполненной отработавшими газами, а при калибровке - у трубы, заполненной воздухом. Подачу чистого воздуха в сравнительную трубу 1 обеспечивает вентилятор 6. Требуемое давление отработавших газов замеряется манометром 7, который выполнен в виде U-образного водяного пьезометра с диапазоном 0 - 100 мм вод. ст. Давление регулируется с помощью заслонки 8 и перепускного клапана 12.

В качестве источника света используется 12-вольтовая кварцевая галогеновая лампа мощностью 55 Вт с рабочей температурой 2800 - 3250 К. Отработавшие газы из двигателя через дросселирующее устройство поступают в рабочую трубу 2, источник света 3 просвечивает эту трубу в продольном направлении. При этом часть светового потока поглощается газами, в результате чего фотоэлемент 4, расположенный на противоположном конце трубы, регистрирует непоглощенную часть светового потока. Сравнительная (калибровочная) труба 1 служит для тарировки (установки нуля) микроамперметра, подключенного к фотоэлементу. Чистый воздух от вентилятора 6 сначала выходит через концы трубы, а затем непрерывно во время замера омывает источник света и фотоэлемент, расположенные у концов рабочей трубы, что уменьшает погрешность в замерах дымности. Поступление отработавших газов происходит в том случае, если давление отработавших газов превышает противодавление, создаваемое вентилятором. В периоды между замерами фотоэлемент и источник света должны быть установлены в сравнительной трубе, так как в этом положении они контактируют с чистым воздухом от вентилятора и обеспечивается их защита от непосредственного контакта с отработавшими газами.

Дымомер «Хартридж» можно использовать при испытании дизеля, установленного на тормозном стенде или на раме автомобиля, испытываемого в дорожных условиях. В последнем случае он используется как переносной и подсоединяется к выхлопной трубе транспортного средства. Необходимо отметить, что в дымомере свет поглощается и рассеивается не только частицами несгоревшего топлива, твердыми частицами и аэрозолями, но и некоторыми газообразными компонентами отработавших газов. Следовательно, при замере дымности определяется только оптическая плотность отработавших газов.

Во время испытаний под нагрузкой обеспечивается непрерывный процесс измерений дымности с индикацией получаемых данных. Дымомер автоматически определяет максимальное значение и производит расчет среднего значения для нескольких периодов подачи газа.

5.8.2. Метод прокачки через фильтр. Дымомер фирмы «Бош»

Устройство обеспечивает пропуск определенного количества отработавших газов через бумажный фильтрующий элемент. На каждой стадии испытаний осуществляется регистрация объемов анализируемого газа, что позволяет получить полные и сравнимые между собой результаты. Система также позволяет контролировать и компенсировать действие других факторов (давления, температуры и др.). Для оптико-электронной оценки почернения фильтрующей бумаги применяется светоотражающий фотометр. Результаты представляются в виде показателя сажесодержания Бош или массовой концентрации сажи в газе ($мг/м^3$).

Соотношения между единицами дымности ОГ дизелей представлены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Соотношения между единицами дымности ОГ дизелей

%	м^{-1}	Bosch	г/м^3
10	0,25	1,10	0,033
12	0,30	1,30	0,042
14	0,35	1,48	0,052
16	0,41	1,67	0,062
18	0,46	1,84	0,071
20	0,52	2,02	0,081
22	0,58	2,18	0,091
24	0,64	2,34	0,101
26	0,70	2,50	0,111
28	0,76	2,64	0,122
30	0,83	2,77	0,133
32	0,90	2,89	0,144
34	0,97	3,02	0,156
36	1,04	3,14	0,168
38	1,11	3,26	0,181
40	1,19	3,37	0,193
42	1,27	3,47	0,206
44	1,35	3,59	0,220
46	1,43	3,70	0,234
48	1,52	3,80	0,248
50	1,61	3,91	0,264
52	1,71	4,01	0,281
54	1,81	4,12	0,299
56	1,91	4,22	0,317
58	2,02	4,32	0,335
60	2,13	4,42	0,355
62	2,25	4,52	0,375
64	2,38	4,62	0,395
66	2,51	4,72	0,416
68	2,65	4,81	0,439
70	2,80	4,91	0,462
72	2,96	5,01	0,489
74	3,13	5,12	0,514
76	3,32	5,23	0,544
78	3,52	5,34	0,575
80	3,74	5,45	0,609
82	3,99	5,57	0,648
84	4,26	5,72	0,691
86	4,57	5,87	0,737
88	4,93	6,04	0,786
90	5,35	6,22	0,844

Контрольные вопросы к главе 5

1. Перечислите основные методы оценки токсичности газовых проб.
2. Опишите сущность хроматографического анализа.
3. Объясните принципы работы и конструкцию оптико-акустического газоанализатора.
4. Объясните принципы работы и конструкцию пламенно-ионизационного газоанализатора.
5. Объясните принципы работы и конструкцию хемилюминесцентного газоанализатора.
6. Для каких целей применяются термокондуктометрические газоанализаторы?
7. Особенности работы дымомера фирмы «Хартридж».
8. Особенности работы дымомера фирмы «Бош».
9. Перечислите оборудование, используемое для испытаний автомобильных дизелей на дымность отработавших газов.

ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

6.1. Влияние состава рабочей смеси на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

Коэффициент избытка воздуха α оказывает значительное влияние на уровень токсичных выбросов с отработавшими газами.

Зависимость состава ОГ двигателя с искровым зажиганием от коэффициента избытка воздуха α представлена на рис. 6.1.

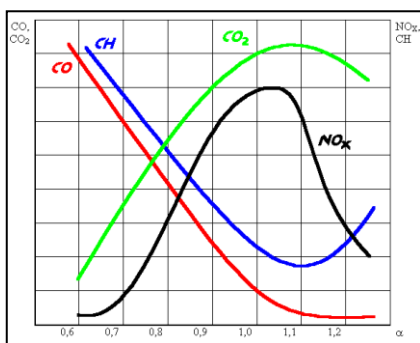


Рис. 6.1. Зависимость состава ОГ двигателя с искровым зажиганием от коэффициента избытка воздуха

Концентрация CO в ОГ достигает минимума при составе смеси близком к стехиометрическому, а концентрация C_nH_m при $\alpha > 1,1$ сначала падает, а затем резко возрастает.

Увеличение количества C_nH_m в ОГ при работе на обедненных смесях объясняется малой скоростью их сгорания и значительной неравномерностью циклов. Кроме этого, наблюдаются пропуски

зажигания и несгоревшие углеводороды выбрасываются в ОГ.

Максимальная концентрация NO_x в ОГ карбюраторных и дизельных двигателей соответствует наиболее экономичным режимам работы, а затем понижается, несмотря на возрастание количества воздуха в смеси. На режимах работы двигателя, соответствующих наибольшему КПД, процесс сгорания протекает с наименьшей продолжительностью, что приводит к росту температуры сгорания.

При работе двигателя на богатых смесях $\alpha < 1,0$ максимальная концентрация окислов азота NO_x в ОГ обусловлена отсутствием свободного кислорода, а при работе на обедненных смесях – максимальной температурой сгорания.

Следует отметить, что необходимо также учитывать восстанавливающее воздействие CO на кислородные соединения азота. Так, в двигателе с искровым зажиганием максимальные температуры наблюдаются при несколько обогащенных смесях ($\alpha \approx 0,92$), однако, максимальные концентрации окислов азота отмечаются при сгорании несколько обедненных смесей ($\alpha \approx 1,05$).

6.2. Влияние нагрузки на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

В ДВС с искровым зажиганием ($ИЗ$) повышение мощности достигается изменением положения дроссельной заслонки, т.е. благодаря увеличению количества топливовоздушной смеси, поступающей в цилиндры двигателя (*количественное регулирование*).

При частичной нагрузке в результате прикрытия дроссельной заслонки ухудшается процесс газообмена, увеличивается доля остаточных газов от предыдущего цикла. Это оказывает значительное влияние на состав смеси (которая должна быть обогащенной) и процесс сгорания, а следовательно, и на концентрацию токсичных компонентов в ОГ.

С этой точки зрения более экономичным является дизель, в котором при частичных нагрузках изменяется количество подаваемого топлива, а количество воздуха остается практически всегда одинаковым (*качественный способ регулирования*), как и количество ОГ.

Влияние нагрузки двигателя на состав смеси и содержание токсичных компонентов в отработавших газах двигателя с искровым зажиганием представлено на рис. 6.2.

Система регулирования оказывает влияние не только на состав смеси, но и на содержание токсичных компонентов в ОГ. В диапазоне средних нагрузок двигатель с $ИЗ$ работает на смеси близкой к стехиометрической. При этом на режимах 40...70% нагрузок концентрация CO является наименьшей и составляет 1...2%, концентрация C_nH_m также незначительна, а концентрация NO_x достигает максимальной величины. При возрастании нагрузок в двигатель подается более богатая смесь (α уменьшается).

ется) необходимая для обеспечения максимальной мощности. В результате наблюдается резкое возрастание выброса CO , несколько меньшее увеличение выброса C_nH_m и резкое уменьшение выброса NO_x .

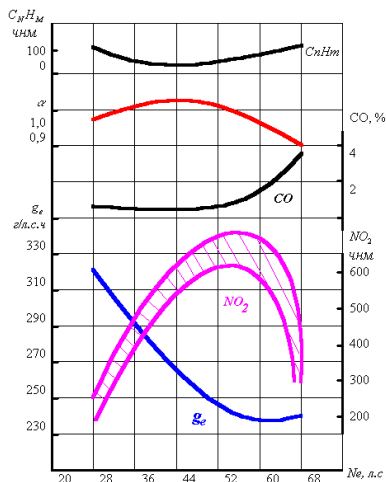


Рис. 6.2. Влияние нагрузки двигателя на состав смеси и содержание токсичных компонентов в отработавших газах двигателя с ИЗ

При работе двигателя на полной нагрузке α уменьшается до $\alpha \approx 0,9$, а концентрация CO составляет 4...5%.

Изменение дымности, а также концентрации NO_x , C_nH_m и CO в отработавших газах дизелей представлено на рис. 6.3.

По мере роста нагрузки и уменьшения коэффициента избытка α происходит рост температуры отработавших газов и соответственно дымности ОГ. Одновременно происходит рост выброса NO_x , уменьшение выброса C_nH_m . Причем эти тенденции наиболее сильно проявляются в дизелях с неразделенной камерой сгорания. Выбросы C_nH_m и CO для дизелей с разделенной камерой сгорания слабо зависят от изменения нагрузки двигателя.

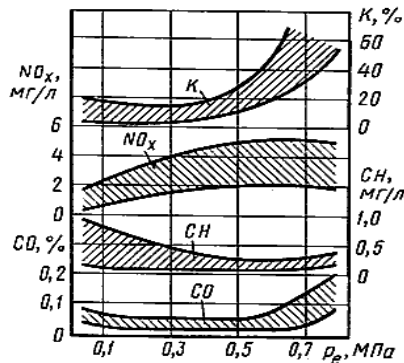


Рис. 6.3. Изменение дымности, K , $С_nH_m$ и $СО$ в отработавших газах дизелей

6.3. Влияние частоты вращения коленчатого вала на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

Сразу стоит отметить, что установить в чистом виде влияние частоты вращения коленчатого вала (КВ) на выброс токсичных веществ *не представляется возможным*.

При работе двигателя по скоростным характеристикам изменяется ряд параметров, определяющих протекание рабочего процесса (качество наполнения, теплообмен, турбулизация заряда в цилиндре, опережение зажигания (впрыскивания топлива), скорость воздуха в диффузоре карбюратора и т.д.).

Таким образом, влияние частоты вращения КВ двигателя на протекание процессов смесеобразования и сгорания, а, следовательно, и на состав отработавших газов *является опосредствованным*.

На рис. 6.4 представлены диапазоны содержания токсичных компонентов и изменение дымности ОГ дизелей с различными способами смесеобразования в зависимости от режима работы.

Увеличение частоты вращения приводит к снижению дымности ОГ вследствие улучшения смесеобразования, однако при $n > 2000 \text{ мин}^{-1}$ дымность опять несколько возрастает, что объясняется превалирующим влиянием сокращения времени сгорания топлива. На образование NO_x , $СО$ и $С_nH_m$ частота вращения влияет слабо.

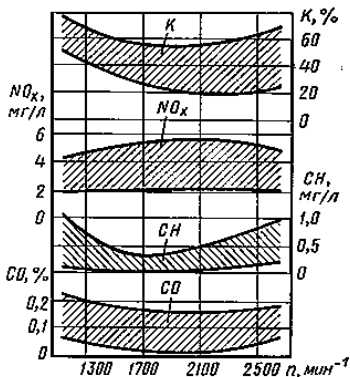


Рис. 6.4. Содержание токсичных компонентов и изменение дымности ОГ дизелей с различными способами смесеобразования в зависимости от режима работы.

Работает наиболее эффективно, концентрация NO_x в ОГ достигает максимальных значений.

Зависимость состава ОГ двигателя с искровым зажиганием

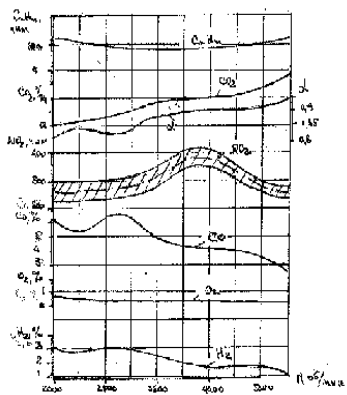


Рис. 6.5. Зависимость состава ОГ двигателя с искровым зажиганием от частоты вращения коленчатого вала

ется изменением состава смеси при полной нагрузке.

Наименьшая концентрация альдегидов наблюдается на средних скоростных и нагрузочных режимах. Интенсивность дымления и токсичность ОГ сильно зависит от технического состояния и регулировок топливной аппаратуры.

При постоянной величине коэффициента избытка воздуха увеличение частоты вращения к.в. двигателя с искровым зажиганием ведет к уменьшению содержания CO , H_2 и C_nH_m в ОГ. В диапазоне частот вращения, при которых двигатель

работает наиболее эффективно, концентрация NO_x в ОГ достигает максимальных значений. Зависимость состава ОГ двигателя с искровым зажиганием от частоты вращения коленчатого вала представлена на рис. 5.5. Следует обратить внимание на характер изменения концентрации NO и NO_x в отработавших газах, которая достигает максимума при частотах вращения коленчатого вала, составляющих 65...75% от номинальной. Влияние частоты вращения коленчатого вала на выбросы CO , H_2 и C_nH_m значительно меньше (на C_nH_m - практически не влияет).

С увеличением частоты вращения снижается только концентрация CO , что объясняется

6.4. Влияние конструкции камеры сгорания на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

Форма камеры сгорания двигателей внутреннего сгорания, конструкция и расположение отдельных ее элементов оказывает существенное влияние на протекание процесса сгорания (момент начала и продолжительность процесса сгорания, распределение температур по объему КС, объем зоны гашения), что отражается на протекании процессов образования и выделения токсичных компонентов с отработавшими газами.

При обычном карбюраторном способе смесеобразования и неразделенной КС процесс образования и выделение токсичных компонентов существенно зависит от:

- объема зоны гашения;
- конструкции поршня и колец;
- интенсивности движения воздушного заряда в камере сгорания;
- положения свечи зажигания.

Объем зоны гашения пламени напрямую связан с *относительной поверхностью камеры сгорания* $F_{КС}/V_{КС}$.

При прочих равных условиях величина $F_{КС}/V_{КС}$ сильно влияет на содержание несгоревших углеводородов C_nH_m в отработавших газах.

На концентрацию CO отношение $F_{КС}/V_{КС}$ практически не влияет.

Исследования состава газа в пограничном слое показывают, что с увеличением $F_{КС}/V_{КС}$ концентрация NO_x в ОГ несколько уменьшается.

Величина $F_{КС}/V_{КС}$ для камеры сгорания данного типа зависит от следующих параметров:

- отношения S/D ;
- рабочего объема цилиндра V_h ;
- степени сжатия ϵ .

Влияние степени сжатия ϵ , отношения S/D и V_h на относительную поверхность камеры сгорания представлено на рис. 6.6

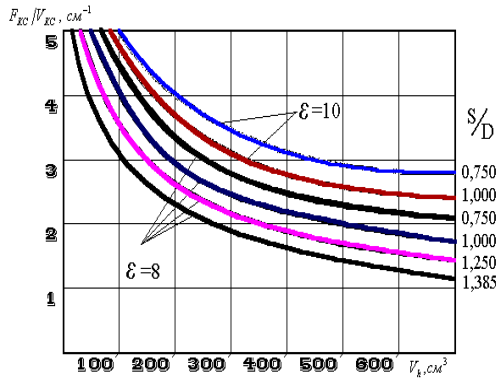


Рис. 6.6. Изменение F_{KC}/V_{KC} в зависимости от S/D и ϵ

При неизменном отношении S/D и ϵ рост V_h связан с увеличением диаметра и хода поршня и, следовательно, с уменьшением F_{KC}/V_{KC} . То есть с повышением степени сжатия ϵ отношение F_{KC}/V_{KC} увеличивается.

Изменением формы камеры сгорания при сохранении постоянным F_{KC}/V_{KC} можно значительно уменьшить содержание C_nH_m в ОГ. Так, например, в камере сгорания полуклинового типа в вытеснителях между днищем поршня и днищем головки цилиндра при малом зазоре 1 (рис. 6.7) создается дополнительная зона гашения.

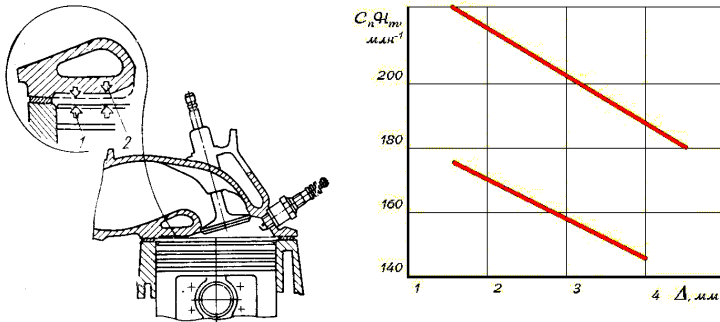


Рис. 6.7. Влияние объема вытеснителя на выбросы C_nH_m

Увеличение зазора 2 (объема вытеснителя) обеспечивает благоприятные условия для окисления углеводородов, что приводит к заметному уменьшению концентрации C_nH_m в ОГ.

В дизелях имеется большое количество разнообразных камер сгорания:

- неразделенные;
- разделенные;
- полуразделенные.

Двигатели с разделенными камерами сгорания имеют дополнительную камеру (вихревую или предкамеру). Все топливо впрыскивается в дополнительную камеру. Для смесеобразования используется энергия входящего с большими скоростями в камеру воздуха. Коэффициент избытка воздуха α в дополнительной камере оказывается меньше единицы (зависит от $\alpha_{\text{общ}}$ и объема камеры).

Сгорание топлива начинается в дополнительной камере и происходит с недостатком кислорода, что приводит к малому образованию NO_x (из-за уменьшения концентрации свободного кислорода). В процессе сгорания горящая смесь вытекает в цилиндр, где при большом избытке воздуха происходит догорание оставшегося топлива и углеводородов. При этом температуры понижены (из-за большого α). Температуры недостаточно высоки для образования NO_x , но достаточны для дожигания сажи и др. продуктов неполного сгорания. Этому способствует хорошее перемешивание в цилиндре из-за больших скоростей вытеснения газа из дополнительной камеры.

В однокамерных дизелях впрыск производится через многодырчатую форсунку. Распределение топлива по объему камеры сгорания зависит от параметров топливной аппаратуры, камеры сгорания и организованного движения воздушного заряда. Сгорание основной массы топлива происходит при $\alpha \approx 1,0$. Это приводит к образованию значительных количеств NO_x . Выгорание сажи и продуктов неполного сгорания в процессе расширения не столь интенсивно. Поэтому дизели с неразделенной камерой сгорания имеют большую токсичность ОГ

Сравнение токсичных выбросов различными типами дизелей представлено в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Токсичные выбросы дизелей с различными типами КС

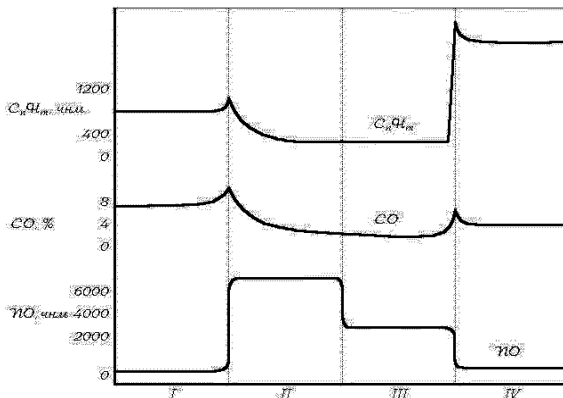
Тип дизеля	г/л.с.ч.			
	CO	$C_p H_m$	NO_x	$C_p H_m + NO_x$
С непосредственным впрыском	5,5...8,5	0,75...2,50	9,5...12,5	10,0...17,0
С предкамерой	2,5...5,7	0,36...0,60	3,2...4,5	5,5...7,3

6.5. Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

На выделение токсичных веществ двигателями влияет большое число различных факторов:

- режим работы двигателя;
- температура деталей камеры сгорания;
- нагарообразование;
- износ цилиндропоршневой группы;
- состояние системы питания и зажигания;
- и т.д.

Влияние режима работы двигателя на состав отработавших газов представлено на рис. 6.8.



Обозначения:

- I – холостой ход
- II – разгон
- III – установившийся режим
- IV – торможение

Рис. 6.8. Влияние режима работы двигателя на состав отработавших газов

Максимальное количество углеводородов C_nH_m выделяется с ОГ в период торможения.

Максимальный выброс CO наблюдается на режиме холостого хода и торможения (*принудительный х.х.*).

Максимальный выброс NO_x наблюдается на режиме разгона (*ускорения*).

На основании изложенного следует, что для уменьшения токсичности серьезное внимание следует уделять *переходным режимам: ускорению и замедлению*.

Дизельные двигатели в отличие от бензиновых при работе на неустановившихся режимах (при прочих равных условиях, т.е. при отсутствии систем снижения токсичности) выделяют значительно меньше токсичных веществ:

- в период разгона значительно увеличивается дымность отработавших газов, но при этом наблюдается несущественное повышение концентрации CO , C_nH_m и NO_x ;
- при торможении двигателем содержание токсичных компонентов и сажи в ОГ снижаются практически до нуля.

Разрежение во впускном трубопроводе ΔP (за дроссельной заслонкой) на режимах холостого хода достигает $0,6 \div 0,7 \times 10^5 \text{ Па}$, а на режимах принудительного холостого хода и того больше – $0,8 \div 0,85 \times 10^5 \text{ Па}$. Поэтому, количество свежей смеси в цилиндрах уменьшается, а количество остаточных газов существенно увеличивается. Коэффициент остаточных газов γ_r может достигать значений $0,35 \dots 0,60$ на холостом ходу. При этом также значительна разница γ_r по отдельным цилиндрам двигателя. Разбавление смеси продуктами сгорания в большой мере влияет на процессы воспламеняемости топливовоздушной смеси. Поэтому при $\gamma_r > 0,4$ возможны пропуски зажигания.

Регулировочная характеристика двигателя МеМЗ-968 на режиме холостого хода представлена на рис. 6.9. Из представленного графика видно, что содержание C_nH_m при $\alpha > 0,9$ начинает возрастать, хотя концентрация CO и H_2 продолжает уменьшаться, что объясняется отключением цилиндров из работы.

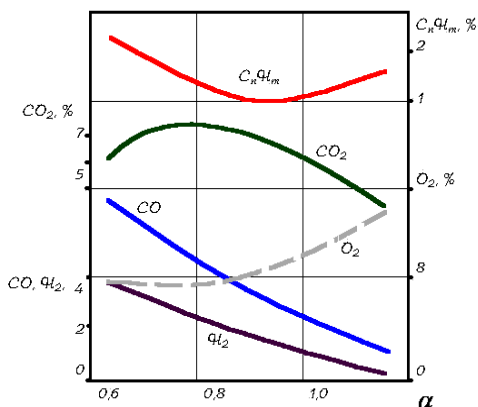


Рис. 6.9. Регулировочная характеристика Mem3-968 на режиме XX

Влияние коэффициента остаточных газов на пределы воспламеняемости бензовоздушных смесей иллюстрирует график на рис.6.10.

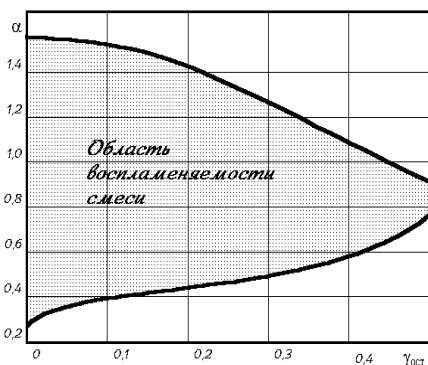


Рис. 6.10. Влияние коэффициента остаточных газов на пределы воспламеняемости

При увеличении γ_r пределы воспламеняемости смеси существенно сужаются. Однако, даже если состав смеси при работе двигателя на холостом ходу находится в пределах воспламеняе-

мости, то увеличение разрежения во впускном коллекторе (т.е. увеличение γ_r) приводит к ухудшению процесса сгорания. Отсюда следует, что на *режимах принудительного холостого хода целесообразно отключать подачу топлива*.

Нарушение регулировок двигателя по углу опережения зажигания (впрыскивания топлива) и составу смеси в процессе эксплуатации существенно влияет на выброс токсичных компонентов с *ОГ*. Последнее существенно для двигателей, не оборудованных специальными системами нейтрализации *ОГ* (подавляющее большинство отечественных автомобилей).

6.5.1. Бензиновые двигатели.

Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

*Угол опережения зажигания $\theta_{зжк}$ оказывает минимальное влияние на концентрацию CO и CO_2 в *ОГ*.*

Уменьшение угла $\theta_{зжк}$ снижает концентрацию C_nH_m . Уменьшение выброса C_nH_m при более позднем зажигании объясняется увеличением их температуры, в результате чего происходит более интенсивное дожигание углеводородов в выпускной системе.

При работе на бедных смесях ($\alpha > 1,0$), концентрация NO_x с уменьшением $\theta_{зжк}$ снижается (снижается максимальная температура сгорания).

При работе на богатых смесях ($\alpha < 1,0$) концентрация NO_x определяется недостатком кислорода, поэтому угол $\theta_{зжк}$ практически не влияет на концентрацию NO_x в *ОГ*.

6.5.2. Дизели. Влияние основных эксплуатационных факторов автомобиля на выбросы вредных веществ с отработавшими газами

*Угол опережения впрыскивания топлива $\theta_{впр}$ существенно влияет на выброс NO_x с *ОГ*.*

При уменьшении $\theta_{впр}$ происходит уменьшение концентрации NO_x в *ОГ* (снижается T_z), однако при этом резко увеличива-

ется дымность $ОГ$, ухудшается экономичность и несколько увеличивается концентрация $СО$ в $ОГ$.

Значительное влияние на выделение токсичных компонентов с $ОГ$ оказывает температура стенок камеры сгорания, которая зависит от способа охлаждения двигателя (жидкостное или воздушное) и от наличия или отсутствия охлаждения поршня. Кроме этого, на нее влияют особенности конструкции камеры сгорания, а также температура охлаждающей жидкости, условия окружающей среды, регулировки двигателя и режим его работы.

При повышении температуры стенок камеры сгорания улучшаются условия протекания реакций окисления в зонах гашения и возрастает температура газов в цилиндре:

- очевидно, что температура в зоне гашения пламени существенно влияет на выброс C_nH_m , чем выше температура стенок камеры сгорания, тем меньше концентрация C_nH_m в $ОГ$;
- концентрация NO_x с повышением температуры стенок возрастает, что связано с ростом $T_{z\ max}$ влиянием пограничного слоя.

При повышении температуры с $30\ ^\circ C$ до $80\ ^\circ C$ охлаждающей жидкости в двигателе с искровым зажиганием концентрация C_nH_m снижается, причем тем сильнее, чем богаче смесь (ниже α), так как больше углеводородов находится в зоне гашения пламени, при этом концентрация NO_x возрастает на $500...700\ млн^{-1}$.

В процессе эксплуатации двигателя на стенках камеры сгорания образуется нагар. Установлено, что в двигателях, работающих на этилированном бензине, нагар практически не оказывает влияние на NO_x и $СО$, но увеличивают на $5..10\%$ концентрацию C_nH_m в $ОГ$ в зависимости от типа двигателя, условий работы и состава топлива.

Изменение параметров воздуха на впуске (температура T_a , давление P_a и влажность) влияет на процесс сгорания, следовательно, и на токсичность $ОГ$.

Температура воздуха на впуске T_a .

С увеличением температуры T_a растет температура заряда в цилиндре и уменьшается количество топливовоздушной смеси η_v (увеличивается относительное разбавление смеси остаточными газами).

С увеличением T_a концентрация NO_x при работе на бедных смесях $\alpha > 1,0$ заметно возрастает до $T_a = 370...380$ °С, а затем (при $T_a > 380$ °С) начинает уменьшаться.

При работе двигателя на богатых смесях ($\alpha < 1,0$) концентрация NO_x в ОГ практически не зависит от T_a . Изменение T_a заметно влияет на выброс C_nH_m только на очень богатых смесях.

Концентрация CO в ОГ не зависит от T_a , однако на режиме холостого хода (прикрытие дроссельной заслонки ухудшает процесс образования топливовоздушной смеси) увеличение подогрева (рост T_a) улучшает смесеобразование, а следовательно, уменьшает выброс CO .

Давление воздуха на впуске P_a .

При уменьшении P_a концентрация C_nH_m возрастает (ухудшение сгорания при больших разрежениях и уменьшение догорания C_nH_m в выпускной системе из-за снижения температуры).

Концентрация CO практически не зависит от P_a .

При увеличении P_a концентрация NO_x возрастает, причем ее увеличение зависит от α .

При очень богатых смесях $\alpha \leq 0,78$ увеличение P_a практически не влияет на выброс NO_x с ОГ двигателя.

Параметры воздуха на впуске в дизель при неизменной подаче топлива ($g_{цикл} = const$) также влияют на коэффициент избытка воздуха α . Поэтому при работе дизеля в высокогорных условиях α может выйти за пределы нормальной работы дизеля. При этом резко увеличивается концентрация CO в ОГ. Для уменьшения токсичности ОГ подачу топлива ($g_{цикл}$) необходимо регулировать в зависимости от условий на впуске (высокогорный корректор).

Влажность воздуха на впуске.

Влажность воздуха на впуске в двигатель влияет на температуру в процессе сгорания (большая теплоёмкость водяного пара по сравнению с теплоёмкостью воздуха).

Увеличение влажности воздуха приводит к уменьшению концентрации NO_x в ОГ.

На выделение C_nH_m значение влажности практически не влияет.

Противодавление на выпуске $\Delta P_{\text{вып}}$.

Зависит от конструктивного исполнения выпускной системы и ее состояния в процессе эксплуатации. Влияние противодавления на выпуске на токсичность ОГ необходимо учитывать при разработке систем нейтрализации, а также для оценки влияния сопротивления выпускной системы в процессе эксплуатации двигателя.

При увеличении противодавления на выпуске на 10% и поддержании неизменной эффективной мощности двигателя ($N_e = const$) отмечено:

- увеличение концентрации NO_x в ОГ в 1,5...2 раза;
- увеличение дымности ОГ в 1,4 раза;
- уменьшение концентрации C_nH_m в 1,25...1,5 раза.

Увеличение противодавления на выпуске повышает γ_r и повышает насосные потери на такте выталкивания. При $N_e = const$ это приводит к снижению α (приходится увеличивать $g_{\text{цикл}}$). Температура заряда в конце сжатия T_c возрастает с увеличением противодавления (увеличивается γ_r). При этом сокращается период задержки воспламенения, что вызывает рост дымности ОГ (до начала видимого сгорания уменьшается время на гомогенизацию топливовоздушной смеси в цилиндре). С ростом T_c растет максимальная температура цикла T_{Zmax} . Это при достаточном избытке кислорода приводит к увеличению концентрации NO_x .

С увеличением противодавления на выпуске увеличивается температура отработавших газов T_r . При увеличении $\Delta P_{\text{вып}}$ с $1,06 \cdot 10^5 \text{ КПа}$ до $1,2 \cdot 10^5 \text{ КПа}$ температура отработавших газов выросла с 365 до 425⁰С.

Увеличение T_r способствует выгоранию C_nH_m в выпускной системе двигателя. Уменьшение C_nH_m с ростом противодавления отмечается и на двигателях с искровым зажиганием.

Основную часть автомобилей, находящихся в эксплуатации, составляют автомобили со средним и большим пробегам. Ав-

томобили с пробегом свыше $80...100$ тыс. км характеризуются значительным выбросом токсичных компонентов с ОГ.

С увеличением пробега степень токсичности отработавших газов автомобиля возрастает. На увеличение выброса C_nH_m влияет герметичность выпускных клапанов, а также степень износа ЦПГ. При негерметичности выпускного клапана часть несгоревшей смеси в период сжатия и в процессе сгорания попадает в выпускной тракт и в атмосферу.

Прорыв *ОГ* в картер через зазоры в ЦПГ в двигателях с открытой системой вентиляции способствует загрязнению атмосферы углеводородами.

Неизбежные изменения регулировочных параметров двигателя в процессе эксплуатации автомобиля также оказывают существенное влияние на уровень токсичных выбросов.

Предупредить увеличение концентрации токсичных компонентов в отработавших газах двигателя в процессе эксплуатации автомобиля можно путем проведения регулярного *ТО* и *ТР*.

Контрольные вопросы к главе 6

1. Каким образом состав рабочей смеси влияет на выброс ВВ с ОГ ДВС?
2. Как влияет нагрузка (N_e) двигателя на выброс ВВ с ОГ ДВС?
3. Как влияет частота вращения коленчатого вала (n) на выброс ВВ с ОГ ДВС?
4. Какие геометрические параметры конструкции камеры сгорания влияют на токсичность ОГ?
5. Каково влияние режима работы двигателя на состав отработавших газов?
6. Какие основные эксплуатационные факторы влияют на выброс ВВ с ОГ ДВС?

ГЛАВА 7. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЕЙ

Токсичность отработавших газов двигателя можно уменьшить двумя путями:

1-й путь – обеспечение таких условий смесеобразования и сгорания топлива, при которых концентрация вредных веществ в отработавших газах становится минимальной;

2-й путь - нейтрализация токсичных веществ, попавших в отработанные газы ДВС.

Устанавливать на двигателе дополнительные устройства для уменьшения токсичности отработавших газов следует при крайней необходимости и только в случаях, если исчерпаны все возможности достижения удовлетворительного состава газов путем конструктивных доработок и регулировок двигателя.

В настоящее время в большинстве случаев применяют различные способы уменьшения концентрации токсичных компонентов в процессе сгорания и расширения.

С этой целью изменяют конструкцию и регулировку двигателей, что позволяет создать условия, необходимые для полного сгорания смеси в широком диапазоне режимов работы двигателя. Это достигается совершенствованием процессов смесеобразования и сгорания.

7.1. Применение на автомобилях двигателей с принудительным зажиганием

Для уменьшения выделений вредных веществ двигателями с искровым зажиганием необходимо предотвратить попадание в атмосферу углеводородов, обусловленное их испарением из топливной системы и выбросами с картерными газами, а также уменьшить содержание основных токсичных компонентов (CO , C_nH_m , NO_x) в ОГ. Главным источником выделения токсичных веществ являются отработавшие газы, причем их состав непосредственно зависит от качества смесеобразования и сгорания.

Так как природа образования токсичных веществ в ОГ различна при рассмотрении возможностей воздействия на рабочий

процесс (PIT) двигателя токсичные компоненты разделяются на группы:

- 1) продукты неполного сгорания (CO , C_nH_m);
- 2) окислы азота (NO_x).

7.1.1. Причины появления и снижение продуктов неполного сгорания

Основными причинами появления CO и C_nH_m в OG являются:

- 1) недостаток (общий или местный) кислорода;
- 2) наличие в цилиндре зон пониженной температуры, в которых происходит или обрыв цепей окисления углеводородов, или очень существенное замедление реакций;
- 3) вялое сгорание или пропуски воспламенения в отдельных циклах.

1. Общий или местный недостаток кислорода в процессе сгорания может быть обусловлен:

- регулировкой карбюратора (или системы впрыскивания топлива) на обогащенную смесь $\alpha < 1,0$;
- низким качеством смесеобразования (неоднородность топливоздушной смеси, наличие жидкой топливной пленки во впускном коллекторе, неоднородность состава смеси по цилиндрам многоцилиндрового двигателя ($\alpha_{цил}$), цикловая неоднородность (от цикла к циклу состав смеси неоднороден).

2. Пониженная температура газа в цилиндре в процессе сгорания наблюдается около стенок камеры сгорания в зоне гашения. Объем газа в зоне гашения зависит от размеров цилиндра, степени сжатия, формы камеры сгорания, отношения S/D , наличия вытеснителей. Кроме этого, в отдельных зонах объема камеры сгорания из-за неоднородности состава α топливоздушная смесь может оказаться вне пределов воспламеняемости. Это также приводит к понижению температуры с высоким содержанием C_nH_m .

3. Причиной вялого (*пропуски зажигания*) сгорания смеси в отдельных циклах могут быть *отклонения от оптимального состава смеси α и турбулентности в зоне свечи*, различия в об-

щем **составе смеси в отдельных циклах**. Степень цикловой неравномерности зависит от способа зажигания топливовоздушной смеси, от энергии свечи и т.д.

Вялое сгорание и пропуски зажигания могут иметь место, когда смесь сильно разбавлена остаточными газами, что имеет место на режимах х.х. и в двухтактных двигателях.

Таким образом, для уменьшения выброса токсичных продуктов неполного сгорания (CO и C_nH_m) с ОГ необходимо:

- 1) обеспечить работу двигателя на различных режимах на обедненной смеси ($\alpha > 1,0$);
- 2) улучшить качество смесеобразования (гомогенизация смеси, равномерность распределения смеси по цилиндрам);
- 3) уменьшать объем топливовоздушной смеси в зоне гашения;
- 4) уменьшать цикловую неравномерность, повышая качество смесеобразования и совершенствуя систему зажигания;
- 5) не допускать сильного разбавления топливовоздушной смеси остаточными газами.

7.1.2. Причины появления и снижение окислов азота

Исследования образования NO_x в цилиндре двигателя показали, что максимально достигнутые в процессе сгорания концентрации NO_x (за исключением работы двигателя на богатой смеси) сохраняются *неизменными* в процессе расширения и выпуска.

Поэтому единственная возможность сократить выделение NO_x состоит в том, чтобы предотвратить или уменьшить окисление азота в зоне продуктов горения в период сгорания.

Количество, образовавшихся окислов азота NO_x , является функцией от:

- 1) температуры;
- 2) концентрации молекулярного и атомарного кислорода;
- 3) времени реакции.

На общее время реакции, которое определяется главным образом частотой вращения коленчатого вала ДВС и продолжи-

тельностью процесса сгорания, воздействовать можно лишь в ограниченных пределах.

Для существенного уменьшения образования NO_x практически имеются два способа:

- 1) снижение температуры в процессе сгорания;
- 2) проведение сгорания с недостатком кислорода в зоне сгорания;
- 3) их комбинация.

1. Способы снижения температуры в камере сгорания и в зоне продуктов сгорания:

1.1 Увеличение или уменьшение α относительно величины, при которой имеет место максимальная температура. Максимальная температура (с учетом диссоциации) соответствует $\alpha \approx 0,9$. Необходимо учитывать, что при изменении α изменяется и концентрация кислорода, что влияет на выделение NO_x , поэтому максимальная концентрация NO_x имеет место при $\alpha = 1,05 \dots 1,10$.

1.2 Увеличение в цилиндре двигателя инертной доли заряда, не участвующей в процессе сгорания, но забирающей часть теплоты от сгорания (увеличение количества остаточных газов, так называемая рециркуляция ОГ, добавка воды к воздуху или топливу и т.д.).

1.3 Уменьшение угла опережения зажигания (от оптимального), что приводит к сгоранию топлива при большем объеме цилиндра, а следовательно, и при меньших температурах.

7.1.3. Сгорание с недостатком кислорода в зоне горения

Уменьшить поступление кислорода в зону реакции можно только одним путем – общим или местным обогащением смеси (при этом также будет изменяться температура сгорания).

Значительное уменьшение концентрации NO_x возможно при обогащении смеси до $\alpha = 0,6 \dots 0,8$ или обеднении $\alpha > 1,15$. При уменьшении α до $0,6 \dots 0,8$ одновременно резко увеличивается выделение продуктов неполного сгорания (CO и C_nH_m), а также существенно ухудшаются мощностные и экономические показатели двигателя.

Таким образом, этот путь не перспективен.

Работа двигателя на обедненной смеси при $\alpha > 1,20$ характеризуется увеличением *неидентичности* последовательных циклов, становится неустойчивой.

При введении специальных мер, обеспечивающих стабильное воспламенение и быстрое сгорание бедных топливоздушных смесей, данный метод уменьшения токсичности оказывается ***перспективным***.

Местное обогащение топливоздушной смеси связано с расслоением заряда в цилиндре, т.е. послойным смесеобразованием и сгоранием.

Для уменьшения выбросов основных токсичных веществ (NO_x , CO и C_nH_m) целесообразно вводить глубокое расслоение смеси, при котором в первой стадии процесс сгорания протекает в зоне обогащенной смеси, а во второй – в зоне обедненной смеси. Выход окислов азота NO_x в первой стадии ограничивается недостатком кислорода, а во второй – низкими температурами.

При послойном смесеобразовании обогащенную смесь подают в зону свечи зажигания, что создает благоприятные условия для воспламенения смеси и формирования начального очага пламени, что обеспечивает, в свою очередь, устойчивую работу двигателя на обедненных смесях. Это ведет к уменьшению цикловой неравномерности (при общем коэффициенте $\alpha > 1,30$, что сказывается на экономичности двигателя).

7.2. Применение на автомобилях дизельных двигателей

Основными токсичными компонентами ОГ дизелей являются окислы азота и сажа (NO_x и D_x).

Характер образования окислов азота в цилиндре дизеля таков же, как и в бензиновых двигателях: они появляются в результате окисления атмосферного азота кислородом (атомарным или молекулярным) в зоне продуктов сгорания.

Отличие состоит в том, что состав заряда цилиндра в дизелях имеет существенно большую неоднородность в процессе сгорания. В процессе расширения происходит «закалка» максимальной концентрации NO_x . Поэтому также необходимо воздействовать на процесс образования NO_x . Пути воздействия те же,

что и в бензиновых двигателях. Различие состоит лишь в том, что дизели (при любом типе смесеобразования) в условиях нормальной эксплуатации работают при $\alpha > 1,40$, а поэтому уменьшить концентрацию кислорода в зоне сгорания можно только локально, т.е. организацией расслоения заряда.

Для уменьшения температуры в дизелях применяют те же методы (уменьшение угла опережения впрыска топлива, добавление к заряду инертной массы).

Выделение сажи дизелями можно сократить двумя путями:

- уменьшение сажеобразования в процессе сгорания;
- создание условий для выгорания сажи в процессе расширения.

При неизменной конструкции камеры сгорания и способа смесеобразования с целью уменьшения выбросов токсичных веществ на рабочий процесс можно воздействовать:

- 1) изменением состава смеси,
- 2) углом опережения зажигания (впрыскивания) топлива,
- 3) регулировкой фаз газораспределения (углом перекрытия клапанов),
- 4) степенью сжатия,
- 5) количеством свечей и т.д.

7.3. Воздействие изменением на автомобилях состава смеси

График зависимости концентрации вредных веществ в ОГ ДВС с ИЗ от состава смеси представлен на рис.6.1.

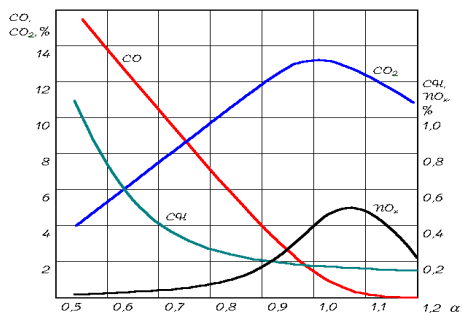


Рис. 7.1. Зависимость концентрации ВВ от состава смеси

Минимальное содержание CO и C_nH_m в ОГ соответствует регулировке двигателя на экономичный режим $\alpha=1,05\dots 1,10$. Дальнейшее обеднение смеси приводит к повышению концентрации C_nH_m . Максимальное содержание NO_x также приходится на экономичный режим, так как на этом режиме работы двигателя с ИЗ (при некотором обеднении смеси) при высоких температурах сгорания имеется достаточно большое количество свободного кислорода в зоне продуктов сгорания.

При изменении α существенно изменяется продолжительность первой фазы сгорания, что при неизменном угле опережения зажигания смещает процесс видимого сгорания по отношению к ВМТ и тем оказывает дополнительное влияние на температуру газа.

Для существенного уменьшения концентрации NO_x необходимо отказаться от экономичных регулировок. Наиболее целесообразно обеднять смесь до $\alpha>1,20$, так как при этом выделение CO и C_nH_m минимально, а экономичность двигателя остается на приемлемом уровне. Однако в этом случае необходимо применять специальные меры для уменьшения цикловой неравномерности и более равномерного распределения топлива по цилиндрам.

При увеличении α от $0,85$ до $1,10$ степень цикловой неравномерности δ увеличивается с $0,04$ до $0,23$.

7.4. Угол опережения зажигания

Зависимость концентрации несгоревших углеводородов и окиси углерода от угла опережения зажигания показана на рис.6.2, из которого следует, что на концентрацию CO и CO_2 в ОГ изменение $\theta_{зж}$ практически не влияет.

Концентрация C_nH_m при уменьшении угла опережения зажигания уменьшается. Однако при чрезмерно позднем зажигании (после ВМТ) возможно увеличение C_nH_m .

Уменьшение концентрации C_nH_m при более позднем зажигании объясняется тем, что температура газов, выходящих из цилиндра, увеличивается; это приводит к более интенсивному окислению углеводородов в выпускной системе.

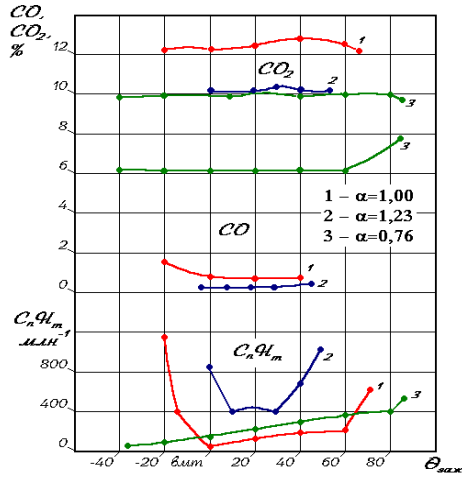


Рис. 7.2. Зависимость выбросов C_nH_m от $\theta_{зaj}$

Влияние угла опережения зажигания на концентрацию NO_x представлено на рис.7.3.

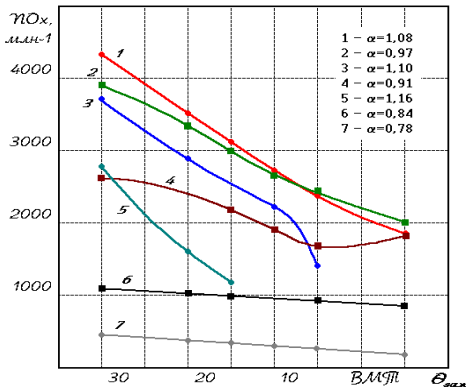


Рис. 7.3. Влияние $\theta_{зaj}$ на концентрацию NO_x

При работе двигателя на обедненных смесях $\alpha > 1,0$ с уменьшением угла опережения зажигания $\theta_{зaj}$ резко снижается концентрация NO_x в ОГ. Это связано с понижением максимальной температуры цикла, которая в данном случае ограничивает выход окислов азота.

При работе двигателя на обогащенных смесях $\alpha = 0,84 \dots 0,78$ выход окислов азота ограничивается недостатком кислорода в продуктах сгорания.

Поэтому изменение $\theta_{зж}$ практически не влияет на концентрацию NO_x в ОГ.

Относительное изменение концентрации NO_x в зависимости от момента начала (опережения зажигания) и продолжительности видимого сгорания представлено на рис. 7.4.

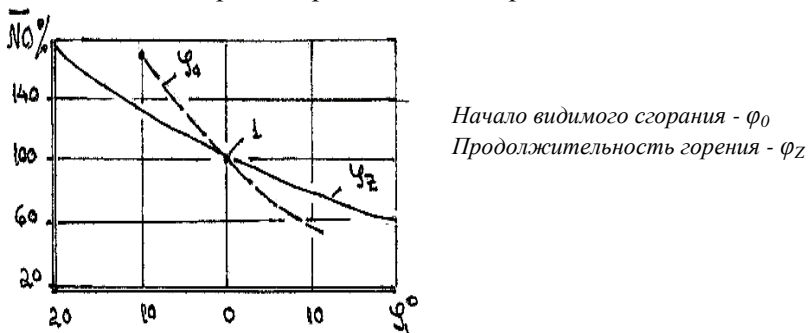


Рис. 7.4. Относительное изменение концентрации NO_x в зависимости от φ_0 и φ_z

Из представленного графика следует, что изменение начала видимого сгорания φ_0 более резко влияет на выделение NO_x , чем изменение его продолжительности.

Таким образом, на выделение токсичных веществ ДВС с искровым зажиганием большое влияние оказывает *состав смеси и угол опережения зажигания*.

Подбирая оптимальные (с точки зрения уменьшения токсичности) значения указанных параметров, можно значительно уменьшить выделение вредных веществ. Это в равной степени относится и к двигателям с впрыском бензина.

Относительные регулировки двигателя являются эффективным средством уменьшения выделения продуктов неполного сгорания.

7.5. Применение на автомобилях углов перекрытия клапанов

Угол перекрытия клапанов выбирают из условий обеспечения максимального наполнения цилиндров η_v .

В период перекрытия клапанов продукты сгорания забрасываются во впускной трубопровод и цилиндр (так называемый «обратный выброс»). Это приводит к частичному разбавлению топливоздушнoй смеси продуктами сгорания.

Влияние угла перекрытия клапанов на концентрацию C_nH_m в ОГ двигателя с ИЗ при работе с различными α на холостом ходу представлено на рис. 7.5.

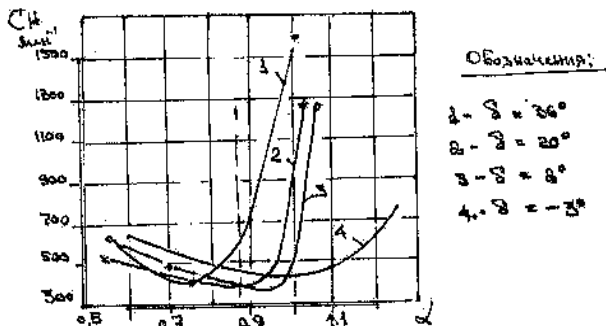


Рис. 7.5. Влияние угла перекрытия клапанов на концентрацию C_nH_m в ОГ

На режимах х.х. и торможения, когда дроссельная заслонка прикрыта почти полностью, разрежение во впускном трубопроводе и в цилиндре увеличивается, что приводит к увеличению количества продуктов сгорания, попавших в цилиндр, к ухудшению процесса сгорания. Особенно опасным это становится при работе на обедненных смесях ($\alpha > 1$).

Поэтому на режимах х.х. и торможения (при которых концентрация C_nH_m в ОГ велика) необходимо уменьшать угол перекрытия клапанов.

С уменьшением угла перекрытия клапанов δ резко падает содержание C_nH_m , особенно при работе двигателя на смеси с $\alpha \geq 0,87$.

Однако необходимо помнить, что уменьшение угла перекрытия клапанов δ приводит к снижению η_v на большей частоте вращения коленчатого вала.

На режимах полного дросселя, особенно при обедненных смесях, суммарная токсичность определяется в основном содержанием NO_x .

Для их уменьшения как один из методов применяют рециркуляцию ОГ. Либо на указанных режимах заряд цилиндра разбавляют продуктами сгорания, увеличивая угол перекрытия клапанов. *Желательными являются регулируемые фазы газораспределения.*

7.6. Применение на автомобилях различных степеней сжатия

Зависимость концентрации $C_n H_m$ от степени сжатия ε для различных значений α и $\theta_{зак}$ двигателя с ИЗ представлена на рис. 7.6.

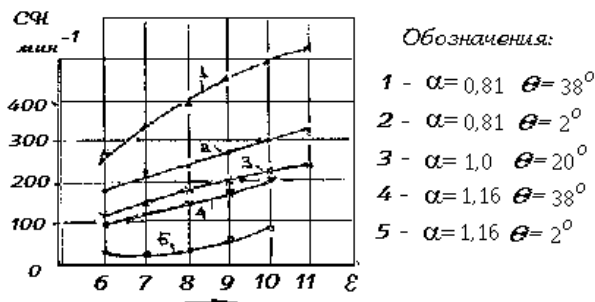


Рис. 7.6. Зависимость концентрации $C_n H_m$ от степени сжатия ε двигателя с ИЗ для различных α и $\theta_{зак}$

В исследованном диапазоне α при увеличении степени сжатия ε концентрация $C_n H_m$ возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении ε возрастает относительная поверхность камеры сгорания F_{KC}/V_{KC} что увеличивает объем зоны гашения и соответственно количество несгоревших углеводородов.

Зависимость концентрации NO_x от степени сжатия ε и состава смеси α представлена на рис. 7.7.

Изменение степени сжатия ε существенно влияет на концентрацию NO_x при работе на бедных смесях ($\alpha > 1,0$).

При работе на богатых смесях ($\alpha < 1,0$) влияние степени сжатия значительно уменьшается.

Таким образом, при повышении степени сжатия ε двигателя с искровым зажиганием токсичность *ОГ* несколько повышается

из-за повышения концентрации окислов азота NO_x (при регулировках на обедненную смесь) и концентрации несгоревших углеводородов C_nH_m .

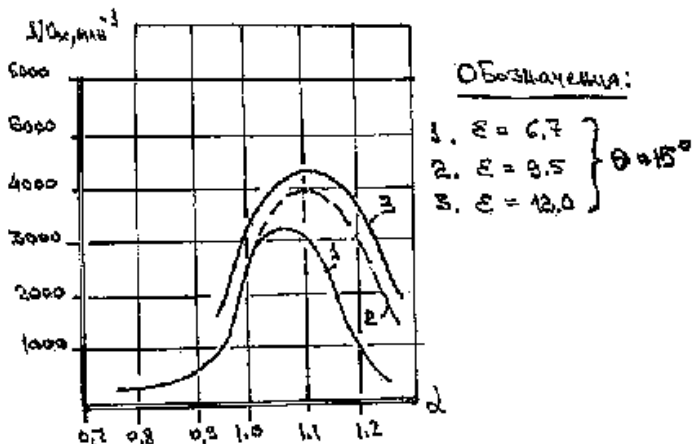


Рис. 7.7. Зависимость концентрации NO_x от степени сжатия и состава смеси

Степень сжатия в дизелях влияет главным образом на выделение окислов азота. Характер влияния тот же, что и в двигателях с искровым зажиганием.

7.7. Воздействие изменением состава смеси дизеля

График изменения концентрации вредных веществ в отработавших газах дизеля с непосредственным впрыском в зависимости от коэффициента избытка воздуха представлен на рис. 7.8. Анализируя представленный график, следует отметить резкое повышение концентрации NO_x при снижении $\alpha < 1,3$. Положение максимума концентрации NO_x зависит от способа смесеобразования и параметров процесса сгорания и находится в пределах $\alpha = 1,6 \div 2,2$. При одинаковых концентрациях CO и O_2 в ОГ, варианты дизелей с наддувом и без него отличаются концентрацией сажи (дымности) и окислов азота. У дизеля с наддувом концентрация NO_x в ОГ при номинальных нагрузках почти в 2 раза меньше. Дизель с наддувом имеет большую продолжитель-

ность впрыскивания топлива. Чем позже топливо сгорает в процессе расширения, тем ниже T_{Zmax} . Кроме этого, при растягивании процесса сгорания по времени увеличивается теплоотдача от газа в стенки, что также понижает температуру цикла.

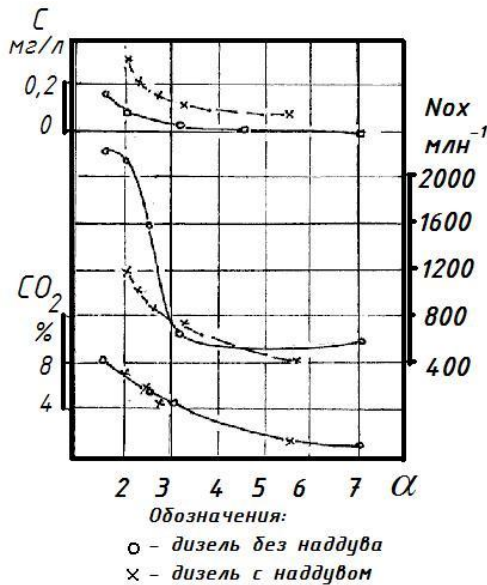


Рис. 7.8. Изменение концентрации ВВ от α

большее количество топлива впрыскивается в зону сгорания и сгорает в диффузионном пламени при недостатке кислорода. Это приводит к образованию большого количества сажи.

Повышенная дымность ОГ дизеля с наддувом указывает на то, что при форсировании дизеля по наддуву необходимы более тщательная доводка процесса смесеобразования и сгорания, усиление турбулизации горючей смеси при сгорании в целях лучшего выгорания сажи.

7.8. Воздействие изменением угла опережения впрыскивания топлива

Влияние угла опережения впрыскивания топлива $\theta_{впр}$ на изменение токсичности и эффективных показателей дизелей (с

Чем ниже максимальная температура цикла при постоянном α , тем меньше NO_x образуется в процессе сгорания. Содержание сажи в ОГ дизеля с наддувом в 2...3 раза больше, чем у дизеля без наддува.

У дизеля с наддувом более высокие давление и температура конца сжатия T_c , а следовательно, меньше период задержки воспламенения. Значит,

камерой сгорания в поршне и полуразделенными КС) представлено на рис. 7.9.

По оси ординат отложено относительное изменение параметров. За исходную точку приняты уровень токсичности и удельный эффективный расход топлива при оптимальном для каждого дизеля угле опережения впрыскивания топлива.

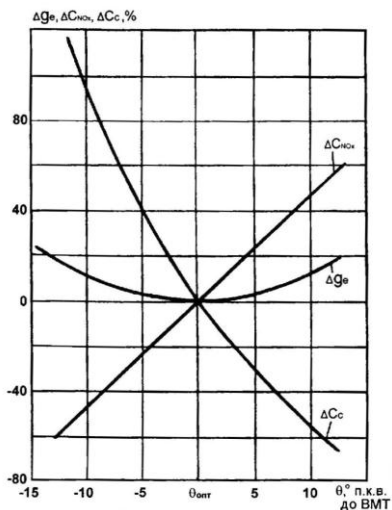


Рис. 7.9. Влияние $\theta_{впр}$ на изменение токсичности и эффективных показателей дизелей

Таким образом, анализируя представленный график, можно констатировать, что уменьшение $\theta_{впр}$ на 10% от оптимального приводит к снижению концентрации NO_x на 50%, однако при этом увеличивается на 10% удельный эффективный расход топлива g_e , и одновременно увеличивается дымность отработавших газов.

Как уже указывалось, низкое качество смесеобразования (а именно: неоднородность топливовоздушной смеси по цилиндрам двигателя, наличие жидкой топливной пленки во впускном коллекторе, цикловая неоднородность состава смеси от цикла к циклу), приводит к существенному увеличению выделения токсичных веществ с ОГ карбюраторных двигателей.

7.9. Воздействие изменением качества смесеобразования

Для улучшения качества смесеобразования применяют различные методы:

- применение предварительного смесеобразования (получение гомогенной топливоздушнoй смеси в специальных устройствах);
- подогрев топливоздушнoй смеси во впускном трубопроводе;
- использование предварительного смесеобразования и подогрева (совместное);
- установка двойных впускных трубопроводов (системы с регулируемыи акустическими характеристиками);
- применение специальных устройств для обеднения смеси на режимах х.х.;
- применение устройств, отключающих подачу топлива на режимах принудительного х.х. (ЭПХХ);
- применение системы непосредственного впрыска топлива;
- подбор оптимальной формы камеры сгорания;
- совершенствование механизма газораспределения (переход на 4-5 клапанные механизмы);
- оптимальная настройка систем впуска и выпуска, системы топливоподачи;
- применение послойного смесеобразования.

7.10. Воздействие применением предварительное смесеобразование

Предварительное смесеобразование исследовалось на двигателях со впрыском во впускной коллектор.

Влияние предварительного смесеобразовании на выделение токсичных веществ с отработавшими газами представлено на рис. 7.10.

На рис. 7.10: 1 – двигатель без предварительного смесеобразования; 2 – с предварительным смесеобразованием.

Для обеспечения предварительного смесеобразования во впускную систему включались последовательно два бака. Топливо впрыскивалось до баков. Перемешивание топлива с воздухом происходит из-за изменения скоростей и направления движения воздуха, а также времени процесса смесеобразования.

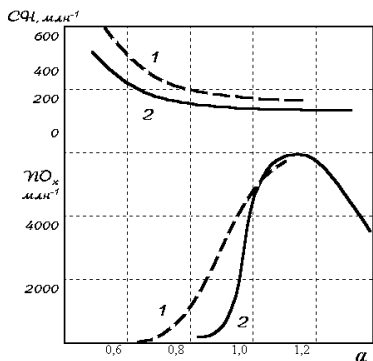


Рис. 7.10. Влияние предварительного смесеобразования на выделение токсичных веществ с ОГ

Из графиков следует, что при предварительном смесеобразовании концентрация C_nH_m ниже при всех значениях α , а NO_x – только на богатых смесях. Рассмотренный способ улучшения смесеобразования связан с усложнением впускной системы и топливоподающей аппаратуры.

7.11. Воздействие подогревом впускного коллектора

Также приводит к улучшению смесеобразования. При этом выделение C_nH_m и CO в ОГ уменьшается, а выбросы NO_x увеличиваются. При работе двигателя на режимах полностью открытой заслонки и при большой частоте вращения коленчатого вала двигателя смесеобразование в карбюраторе хорошее. Поэтому подогрев на этих режимах на выбросы C_nH_m и CO влияет незначительно, а мощность двигателя падает из-за уменьшения η_v .

Следовательно, впускной коллектор целесообразно подогревать на режиме х.х. и малых нагрузок.

В принципе любой способ улучшения смесеобразования и распределения смеси по отдельным цилиндрам расширяет пределы устойчивой работы двигателя на обедненных смесях с уменьшением выбросов C_nH_m и CO .

Основное количество продуктов неполного сгорания выделяется на режимах торможения, ускорения и х.х.

7.12. Применение распределенного впрыска топлива

Замена карбюратора на систему впрыска позволяет:

- обеспечить равномерность распределения топлива по цилиндрам;

- исключить время для стабилизации топливной пленки во впускном трубопроводе, улучшая приемистость двигателя, особенно холодного;
- увеличить η_v из-за отсутствия подогрева впускного коллектора;
- уменьшить гидравлические потери на впуске из-за отсутствия диффузора, а иногда и дроссельной заслонки;
- повысить мощность.

Реализация преимуществ впрыска бензина требует согласования направления топливных струй и потока воздуха в цилиндр, для обеспечения благоприятного расслоения заряда в камере сгорания.

Благодаря распределенному впрыску топлива в пространство перед впускным клапаном достигается хорошее распыливание топлива и смешивание его с воздухом.

При распределенном впрыске двигатель может устойчиво работать на обедненных смесях на всех режимах, и только на режиме полной нагрузке он работает на богатой смеси.

Схема системы распределенного впрыска топлива с электронным управлением *BOSCH* представлена на рис. 7.11.

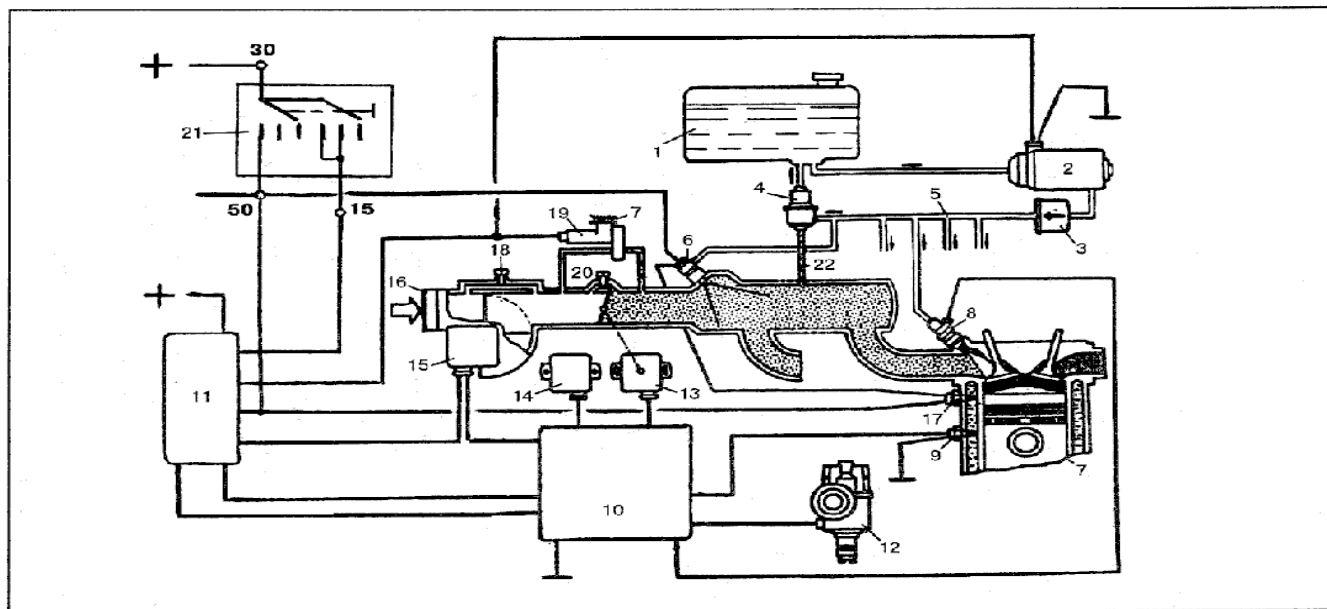


Схема системы впрыска топлива "L-Jetronic":

1 — топливный бак, 2 — топливный насос, 3 — фильтр тонкой очистки топлива, 4 — регулятор давления топлива в системе, 5 — распределительная магистраль, 6 — пусковая форсунка, 7 — блок цилиндров двигателя, 8 — форсунка (инжектор) впрыска, 9 — датчик температуры охлаждающей жидкости, 10 — электронный блок управления, 11 — блок реле, 12 — датчик-распределитель зажигания, 13 — выключатель положения дроссельной заслонки, 14 — высотный корректор, 15 — расходомер воздуха, 16 — подвод воздуха, 17 — термореле, 18 — винт качества (состава) смеси на холостом ходу, 19 — клапан добавочного воздуха, 20 — винт количества смеси на холостом ходу, 21 — выключатель зажигания, 22 — подвод разрежения к регулятору давления топлива в системе

Рис. 7.11. Схема системы впрыска топлива

7.13. Воздействие путем послойного смесеобразования

Для уменьшения выделения основных токсичных компонентов (NO_x , CO и C_nH_m) целесообразно применять расслоение заряда.

Расслоение заряда – это распределение топлива в камере сгорания, при котором в зоне свечи зажигания образуется обогащенная смесь, а по мере удаления от свечи смесь обедняется.

В первой стадии процесс сгорания протекает в зоне обогащенной смеси, а во второй – в зоне обедненной смеси.

Выход *окислов азота* в первой стадии ограничивается *недостатком кислорода*, а во второй – *низкой температурой сгорания*.

При послойном смесеобразовании в двигателях с искровым зажиганием обогащенная смесь находится в зоне свечи зажигания. Это создает благоприятные условия для воспламенения смеси искрой и формирования начального очага пламени, что обеспечивает устойчивую работу двигателя на обедненных смесях и уменьшение цикловой неравномерности.

Все способы послойного смесеобразования могут быть разделены на две основные группы:

- расслоение при применении разделенных камер сгорания;
- расслоение в неразделенной камере сгорания;
- Расслоение смеси внутри цилиндра может быть достигнуто:
- подачей в цилиндр расслоенной смеси;
- с помощью вихревого движения воздуха и впрыска топлива в воздушный поток.

Схема организации процесса с подводом в цилиндр расслоенной смеси представлена на рис. 7.12. По трубопроводу 1 подводится богатая смесь ($\alpha=0,9$), а по трубопроводу 2 подводится бедная смесь ($\alpha=1,3$) или чистый воздух. Богатая смесь подается к свече зажигания, бедная – в сторону от свечи. Благодаря послойному смесеобразованию около свечи $\alpha < 1,0$, что гарантирует воспламенение смеси при $\alpha_{\Sigma} > 1,0$.

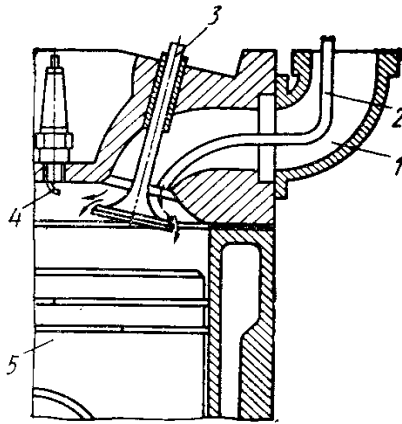


Рис. 7.12. Организации процесса с подводом в цилиндр расслоенной смеси

1 – коллектор подвода богатой смеси; 2 – трубка подвода бедной смеси (воздуха); 3 – впускной клапан; 4 – свеча зажигания; 5 – поршень

Схема работы двигателя Боудри представлена на рис. 7.13.

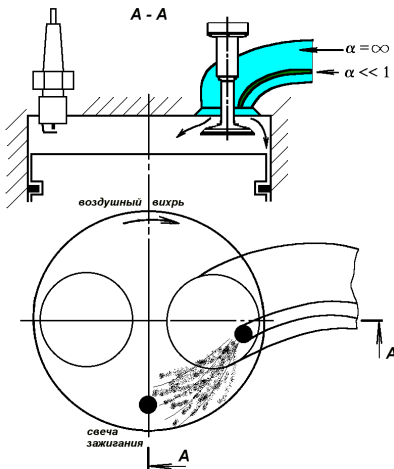


Рис. 7.13. Схема работы двигателя Боудри

Через впускной канал подается чистый воздух. Обогащенная смесь подается в зону клапанной щели через отдельную трубочку. Организованный воздушный вихрь подает обогащенную смесь в зону свечи зажигания, создавая благоприятные условия для воспламенения заряда. Обедненная смесь распределяется по периферийным зонам цилиндра

Особенности:

1. Оптимальное распределение смеси по составу при различных нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя.

2. Чрезмерное переобогащение смеси в зоне свечи ухудшает условия воспламенения.

3. Переобеднение смеси в удаленных от свечи зонах приводит к замедленному сгоранию ($\alpha > 1,7 \div 1,8$).

4. Совместимость расслоения заряда на частичных нагрузках с достаточной однородностью на полных для достижения максимальной мощности.

Недостатки такие же, как и в дизеле: невозможность использования всего воздуха, дымление при больших нагрузках.

Принципиальная схема двигателя с бесфоркамерным факельным дожиганием представлена на рис. 7.14.

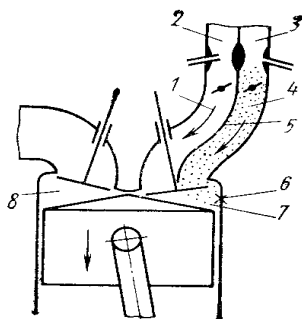


Рис. 7.14. Конструктивная схема двигателя с бесфоркамерным факельным дожиганием:

1,4 – впускные трубопроводы; 2,3 – камеры карбюратора; 5 – перегородка; 6 – свеча зажигания; 7 – зона богатой смеси; 8 – зона бедной смеси

Впускной канал двигателя разделен перегородкой на два канала, соединенных с двухкамерным карбюратором. При работе двигателя на малых и средних нагрузках по каналу 4 из основной камеры 3 карбюратора поступает в цилиндр обогащенная смесь ($\alpha = 0,65 \div 0,75$). По каналу 1 подается чистый воздух; богатая смесь подается в зону свечи зажигания, а чистый воздух – в периферийную часть цилиндра, чему способствует выступ на поршне, который делит камеру сгорания на две части. Бога-

тая смесь в полости 7 поджигается свечой зажигания. При движении поршня вниз факел продуктов неполного сгорания выбрасывается в полость 8, где и происходит их догорание.

Такой способ осуществления рабочего процесса позволяет двигателю устойчиво работать при $\alpha=1,40\div 1,45$ (существенно расширяются пределы обеднения смеси). На режимах максимальной мощности, экономайзер в камере 2 вступает в работу, и в двигатель по каналу 1 подается смесь $\alpha=1,10\div 1,20$. При этом общий состав смеси характеризуется величиной $\alpha=0,85\div 0,90$.

Содержание NO_x в ОГ такого двигателя в 1,5 раза меньше, чем у обычного карбюраторного, что объясняется не слишком глубоким расслоением смеси.

Схемы организации рабочего процесса двигателя «Техасо» и двигателя, работающего по способу Вицкого с различными методами расслоения заряда, представлены на рис. 7.15 и 7.16 соответственно.

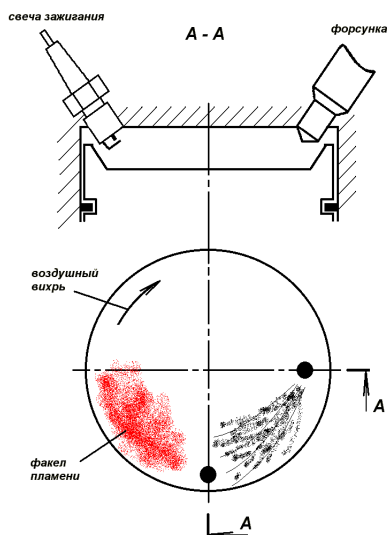


Рис. 7.15. Схема рабочего процесса двигателя «Техасо»

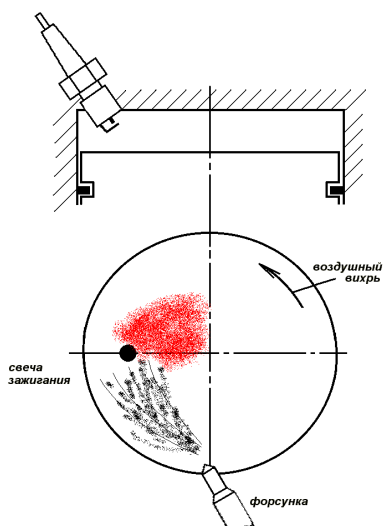


Рис. 7.16. Схема работы двигателя по способу Вицкого

В двигателе «Техасо» легкое топливо впрыскивается в направлении воздушного вихря, пары воспламеняются искрой длительного разряда, состоящей из нескольких последователь-

ных искр (см. рис. 7.15). Этим поддерживается стационарный факел пламени в течение всего периода впрыска. В дальнейшем сгорание завершается вследствие турбулентного смешения продуктов сгорания обогащенной смеси в этом факеле с заполняющим камеру чистым воздухом.

В двигателе Вицкого топливо впрыскивается под некоторым углом против направления вихря, в результате чего пары топлива скапливаются в средней части камеры, где и воспламеняются обычной свечой (рис. 6.16).

Преимущества этих способов. При работе двигателя на малых нагрузках процесс сгорания локализуется в небольшой части камеры сгорания, причем регулирование качественное (дресселирование не требуется).

7.14. Применение в двигателе двуполостных камер сгорания

Принципиальная схема двигателя с разделенной камерой сгорания представлена на рис. 7.17.

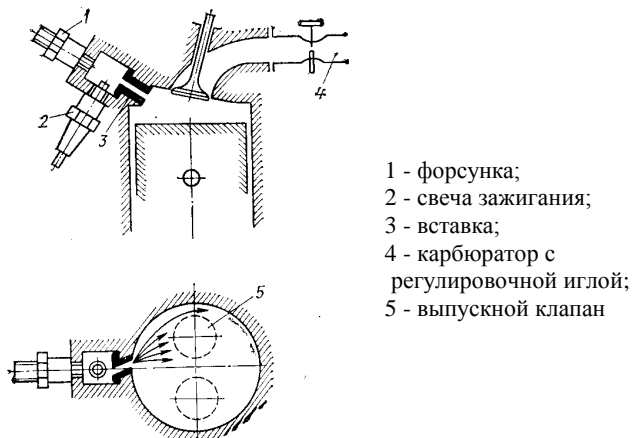


Рис. 7.17. Принципиальная схема двигателя с разделенной камерой сгорания

Форма камеры сгорания двигателя VW с разделенной камерой сгорания представлена на рис. 7.18.

На малых нагрузках топливо впрыскивается только в вихревую камеру, а в цилиндр подается чистый воздух, на больших –

в цилиндр подается обедненная смесь. Регулирование качественное – дросселирование отсутствует. $V_{BK} = 0,28 \div 0,33 V_C$.

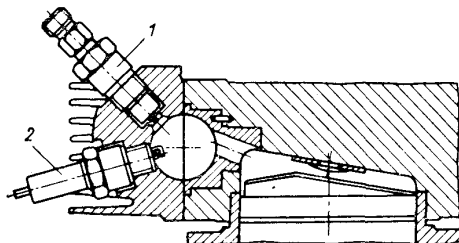


Рис. 7.18. Двигатель VW с расслоением заряда
1 – форсунка; 2 – свеча зажигания

Максимальная концентрация окислов азота в 3,5 раза ниже, чем у обычного двигателя, концентрация CO во всем диапазоне α ниже в 1,5 раза, однако C_nH_m при $\alpha = 0,8 \div 1,0$ выше примерно в 2 раза. Двигатель устойчиво работает при $\alpha = 3,2$.

7.15. Непосредственный впрыск топлива

Система непосредственного впрыска топлива (СНВТ) (Gasoline Direct Injection (GDI)) — Инжекторная система подачи топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания с непосредственным впрыском топлива, у которой форсунки расположены в головке блока цилиндров, и впрыск топлива происходит непосредственно в цилиндры. *Топливо подается под большим давлением в камеру сгорания каждого цилиндра в противоположность стандартной системе распределённого впрыска топлива, где впрыск производится во впускной коллектор.*

Такие двигатели более экономичны (до 20% экономии), отвечают более высоким экологическим стандартам, однако и более требовательны к качеству топлива.

Аббревиатура GDI подразумевает систему непосредственного впрыска на двигателях Mitsubishi. Это произошло потому, что впервые система непосредственного впрыска была применена на двигателе GDI, устанавливаемом на автомобили компании Mitsubishi. Это утверждение верно лишь частично. Так, первый серийный двигатель с непосредственным впрыском был

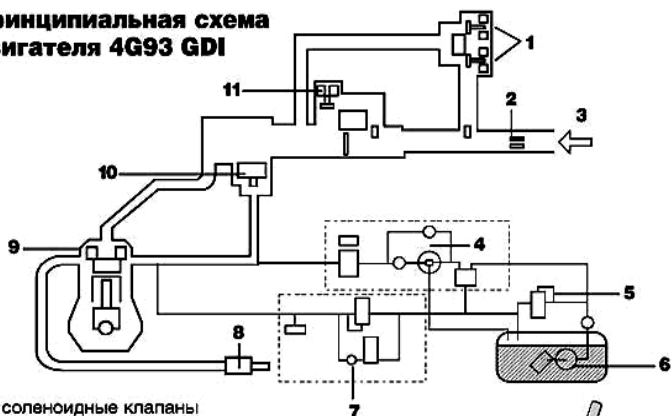
изготовлен Daimler-Benz DB 601 для истребителя Messerschmitt Bf.109E.

Впервые непосредственный впрыск топлива был применен на автомобиле Mercedes W196 формулы 1, на котором знаменитый Х.М. Фанхио выиграл сезоны 1954 и 1955 года.

Mitsubishi первой применила электронно-управляемый непосредственный впрыск топлива, что позволило использовать на некоторых режимах суперобедненную смесь.

Принципиальная схема двигателя 4G93 GDI с непосредственным впрыском бензина представлена на рис. 7.19.

Принципиальная схема двигателя 4G93 GDI



- 1 – соленоидные клапаны
- 2 – датчик воздушного потока
- 3 – впускной коллектор
- 4 – топливный насос высокого давления
- 5 – низковольтный регулятор
- 6 – питающий насос
- 7 – высоковольтный регулятор
- 8 – нейтрализатор окислов азота
- 9 – форсунка высокого давления
- 10 – клапан рециркуляции выхлопных газов EGR
- 11 – клапан-регулятор холостого хода

Распределение смеси в цилиндре 16-клапанного двигателя GDI

- 1 – форсунка-инжектор
- 2 – слой бедной смеси
- 3 – слой богатой смеси
- 4 – слой бедной смеси
- 5 – поршень с выемкой-завихрителем
- 6 – выпускные клапаны
- 7 – впускные клапаны

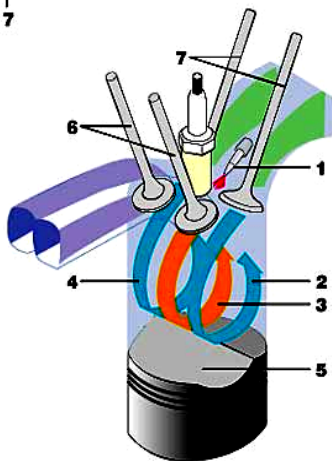


Рис. 7.19. Схема двигателя 4G93 GDI с непосредственным впрыском бензина

7.15.1. Общие сведения

Двигатели с непосредственным впрыскиванием топлива образуют горючую смесь в камере сгорания. Через открытый впускной клапан при такте впуска в цилиндр поступает только воздух. Топливо впрыскивается специальными форсунками 5 непосредственно в камеры сгорания цилиндров (рис. 7.20).

Обычная форсунка располагается вне камеры сгорания, защищенная от всего того, что происходит во время воспламенения и после закрытия впускного клапана. Форсунка, входящая в камеру сгорания, должна выдержать все те изменения температур и давления, которые там происходят, а это усложняет ее. Она также должна впрыскивать топливо быстрее и лучше распылять его. Когда двигатель работает на максимальных нагрузках, другими словами, когда он требует больше топлива, время, отведенное на впрыскивание, уменьшается.

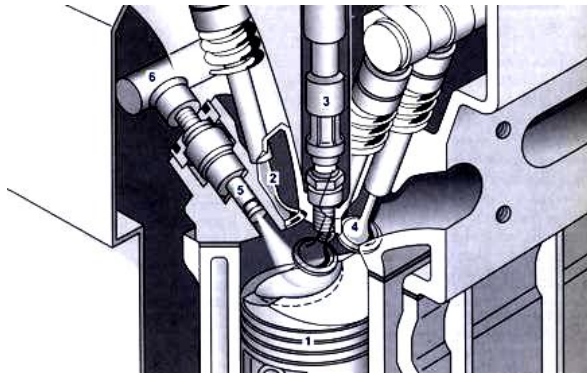


Рис. 7.20. Элементы системы непосредственного впрыска бензина:

1 – поршень; 2 – впускной клапан; 3 – катушка зажигания с установленной свечой зажигания; 4 – выпускной клапан; 5 – форсунка высокого давления; 6 – топливная рейка

Если необходимо, обычная форсунка может подавать топливо в течение большинства циклов, в то время как форсунка непосредственного впрыска не может подавать топливо, когда открыт выпускной клапан, потому что топливо будет удаляться

вместе с отработавшими газами. При непосредственном впрыске время, отводимое на процесс впрыскивания, гораздо меньше, поэтому форсунка должна подавать топливо быстрее, а это требует достаточно высокого давления топлива.

Смешивание – потенциальная проблема непосредственного впрыска. В обычной системе топливо начинает смешиваться с воздухом, когда они проходят через впускной клапан, и продолжают перемешиваться, при тактах впуска и сжатия. Форсунка непосредственного впрыска заполняет топливом центральную часть камеры сгорания за короткое время и должна лучше распылить топливо, чтобы гарантировать однородный состав смеси.

Сложность представляет и расположение форсунки непосредственного впрыска в головке цилиндров. Форсунки обычно типа являются составной частью впускного трубопровода, а форсунка непосредственного впрыска должна располагаться вверху камеры сгорания, где уже размещаются клапаны и свеча зажигания. Кроме этого, остается мало места для прохода охлаждающей жидкости вокруг жизненно важных зон головки цилиндров.

7.15.2. Принцип действия системы GDI

Топливный насос с электрическим приводом 6 (рис. 7.21) подает топливо при начальном давлении $0,3 \dots 0,5 \text{ МПа}$ к насосу высокого давления 1. Этот насос создает давление в системе в зависимости от рабочего режима двигателя (требуемый крутящий момент и частота вращения коленчатого вала). Топливо под высоким давлением поступает в топливную рейку 3 и там накапливается.

Давление топлива измеряется датчиком высокого давления 2 и устанавливается клапаном регулировки давления 4 в значении от 5 до 12 МПа.

К топливной рейке 3 подключены форсунки высокого давления 5, работа которых регулируется блоком управления двигателем. Форсунки впрыскивают топливо в камеру сгорания цилиндра. Впрыснутое тонко распыленное за счет высокого давле-

ния топливо образует с поступающим в камеру сгорания воздухом горючую смесь.

В зависимости от режима работы двигателя топливо впрыскивается так, что создается смесь, равномерно распределенная по всей камере сгорания с соотношением $\alpha \approx 1,0$ (гомогенный режим) или образуется облако с послойным зарядом с соотношением $\alpha \approx 1,0$ в области свечи зажигания (работа в условиях послойно распределенного заряда или обедненной смеси). Остальное пространство камеры сгорания при послойном распределении заряда наполнено либо всасываемым свежим воздухом с инертным газом, поступившим из системы рециркуляции отработавших газов, либо очень обедненной горючей смесью. За счет этого в целом получается обедненная горючая смесь с $a_{\text{суммар}} \approx 2,7$.

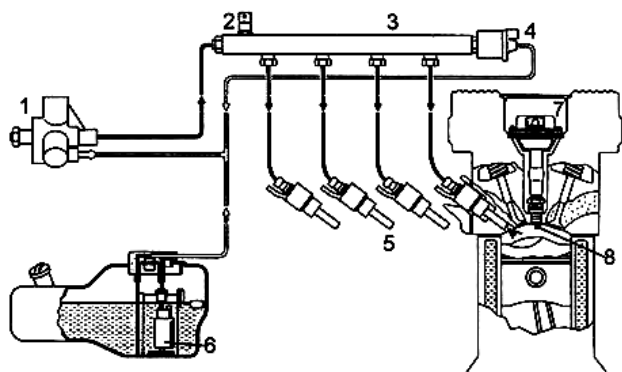


Рис. 7.21. Схема подачи топлива в системе непосредственного впрыска топлива:

- 1 – топливный насос высокого давления; 2 – датчик давления топлива; 3 – топливная рейка; 4 – клапан регулировки давления; 5 – форсунки; 6 – топливный насос с электрическим приводом; 7 – катушка зажигания; 8 – свеча зажигания

Выбор режима работы осуществляется, с одной стороны, на базе частоты вращения коленчатого вала и потребного крутящего момента, а с другой стороны, за счет функциональных требований, таких как, например, восстановление каталитического нейтрализатора накопительного типа.

7.15.3. Приборы подачи топлива

7.15.3.1. Топливная рейка (RAIL)

Функциями топливной рейки (рис. 7.22) являются накопление поступающего от насоса высокого давления топлива и распределение его по форсункам высокого давления. Объем этой рейки достаточно велик для того, чтобы сглаживать пульсацию давления в топливоподающем контуре.

Топливная рейка изготавливается из алюминиевого сплава. Конструктивные формы (объемы, размеры, вес и т.п.) зависят от типа двигателя и системы топливоподачи.



Рис. 7.22. Топливная рейка

Топливная рейка располагает соединительными устройствами для связи с другими элементами системы впрыска (насос, клапан регулировки давления, датчик высокого давления, форсунки высокого давления). Конструкция топливной рейки обеспечивает герметичность ее самой, а также хорошую герметичность в переходных устройствах с различными элементами системы.

7.15.3.2. Топливный насос высокого давления

Насос высокого давления должен сжимать топливо, подаваемое в достаточном количестве топливным насосом с электрическим приводом с начальным давлением 0,3...0,5 МПа до уровня 5...12 МПа, необходимого для впрыскивания под высоким давлением.

При пуске двигателя топливо вначале впрыскивается при начальном давлении. Затем с повышением частоты вращения коленчатого вала происходит рост давления.

При эксплуатации насос высокого давления смазывается и охлаждается исключительно топливом.

В настоящее время на двигателях применяются трехцилиндровые и одноцилиндровые насосы.

7.15.3.3. Трехцилиндровый насос высокого давления НДР1

По своей конструкции это насос радиально-поршневого типа с тремя поршнями, распределенными относительно друг друга через 120° по окружности. На рис. 7.23,*а* и рис. 7.24,*б* показаны продольный и поперечный разрезы такого насоса соответственно.

С приводом от распределительного вала двигателя, входной вал 13 (рис. 7.24) вращается с эксцентриком 1, который при этом обеспечивает возвратно-поступательное движение поршней 4 в цилиндрах 3 насоса.

При ходе поршня вниз (рис. 7.25), топливо поступает при начальном давлении из подающего трубопровода через полый поршень насоса и впускной клапан в нагнетательную камеру.

При движении поршня вверх (рис. 7.26) этот объем топлива сжимается и топливо течет, преодолев давление в топливной рейке, через выпускной клапан к стороне узла высокого давления

За счет выбранного расположения поршней попеременно осуществляется перекрытие подачи топлива, следствием чего является незначительная пульсация подачи и, следовательно, низкая пульсация давления топлива в топливной рейке. Количество подаваемого топлива пропорционально частоте вращения коленчатого вала.

Для гарантирования возможности изменения начального давления в соответствии с потребностью двигателя в топливе (даже при максимальном количестве его впрыскивания) максимальное количество подачи насоса рассчитывается на определенный объем. На режиме работы с постоянным давлением в топливной рейке или при частичной нагрузке давление топлива, поданного в избыточном количестве, сбрасывается клапаном регулировки давления до уровня давления на входе и топливо возвращается на сторону входа насоса.

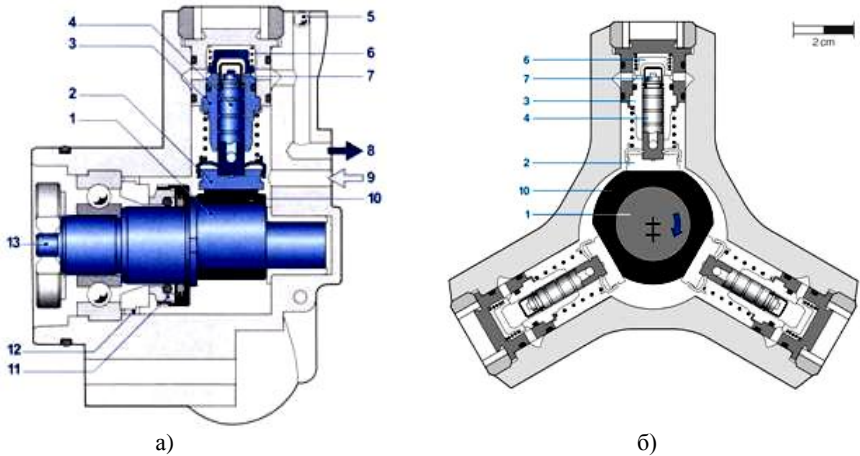


Рис. 7.24. Трехцилиндровый насос высокого давления HDP1:

а – продольный разрез; б – поперечный разрез

1 – эксцентрик; 2 – контактный башмак; 3 – цилиндр насоса; 4 – поршень насоса; 5 – запорный шарик; 6 – выпускной клапан; 7 – впускной клапан; 8 – подача топлива под высоким давлением; 9 – поступление топлива под низким давлением; 10 – кулачковая шайба; 11 – осевое уплотнение; 12 – неподвижная прокладка; 13 – приводной вал

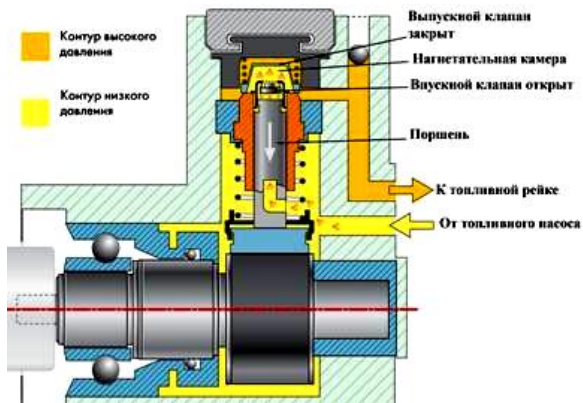


Рис. 7.25. Схема работы насоса при ходе всасывания

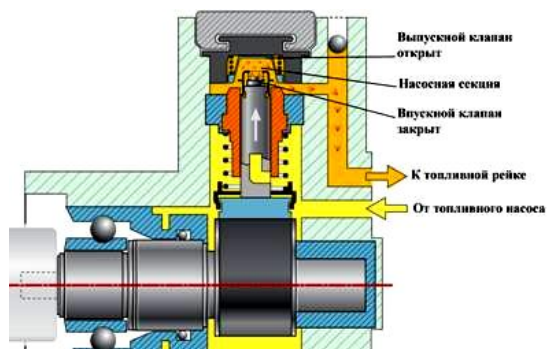


Рис. 7.26. Схема работы насоса при ходе нагнетания

7.15.3.4. Одноцилиндровый насос высокого давления HDP2

Одноцилиндровый насос HDP2 выполнен в виде модуля с непосредственным приводом от кулачка, расположенного на распределительном валу для впускных клапанов (рис. 6.29).



Рис. 7.27. Привод одноцилиндрового топливного насоса высокого давления

На рис. 7.28. показана принципиальная конструкция насоса.

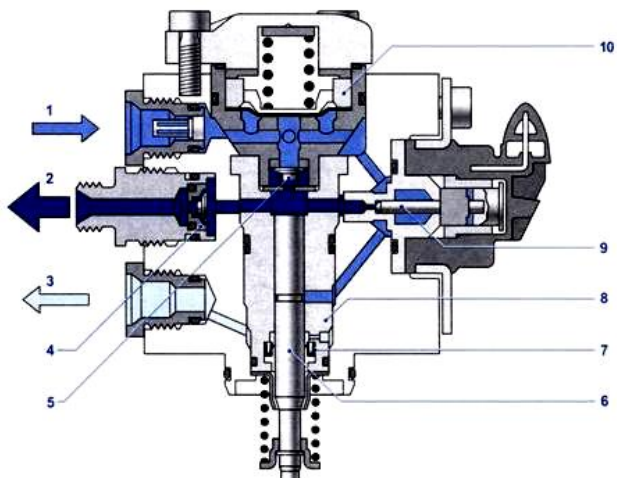


Рис. 7.28. Одноцилиндровый насос высокого давления НДР2:

1 – подача топлива от топливного насоса; 2 – подача топлива к топливной рейке; 3 – возврат утечек топлива в бак; 4 – выпускной клапан; 5 – впускной клапан; 6 – поршень насоса; 7 – уплотнительное кольцо поршня; 8 – цилиндр насоса; 9 – клапан регулирования количества топлива; 10 – демпфер давления

В подающей камере теперь, в дополнение к впускному 5 и выпускному 4 клапану, еще размещен клапан регулирования количества топлива 9 с электрическим переключением и рециркуляцией топлива на вход насоса.

Регулируемый по многопараметровой характеристике одноцилиндровый насос подает всегда столько топлива, сколько его впрыскивается через форсунки.

Момент начала подачи топлива поршнем 6 рассчитывается блоком управления двигателем в соответствии с требуемым его расходом. В расчетный момент движения поршня регулятор давления закрывает впускной клапан, после чего начинается подача топлива к форсункам.

7.15.3.5. Форсунка высокого давления

Форсунка высокого давления представляет собой переходное устройство между топливной рейкой и камерой сгора-

ния. Задача этой форсунки заключается в том, чтобы обеспечить дозирование топлива и путем его распыления добиваться контролируемого смешивания топлива и воздуха в определенной зоне камеры сгорания. В зависимости от режима работы двигателя, топливо концентрируется в зоне вокруг свечи зажигания (послойное распределение заряда) или равномерно распыляется по всей камере сгорания (гомогенное распределение заряда).

Форсунки устанавливаются в головке блока цилиндров и фиксируются на ней с помощью специальных крепежных элементов.

Чтобы получить наилучшее распределение топлива при послойном смесеобразовании, угол конуса факела топлива принят равным 70° , а ось конуса наклонена на 20° (рис. 7.29).

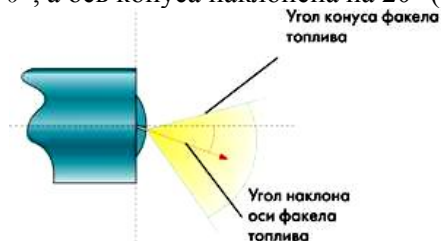


Рис. 7.29. Схема распыливания топлива форсункой

Форсунка высокого давления (рис. 7.30) состоит из следующих элементов: корпуса, седла 6, иглы распылителя 7 с якорем электромагнита, пружины 8, обмотки электромагнита 3.

Когда электрический ток проходит через обмотку электромагнита, создается магнитное поле. За счет этого игла, противодействуя давлению пружины, поднимается над седлом и открывает сопловое отверстие 5 (рис. 7.30) форсунки. За счет разницы в давлении между топливной рейкой и камерой сгорания топливо впрыскивается в камеру сгорания.

При отключении электрического тока игла распылителя под действием усилия пружины опускается на седло клапана и прерывает поток топлива.

Форсунка быстро открывается, обеспечивая при открытии постоянную площадь поперечного сечения отверстия, и снова закрывается, преодолевая давление в топливной рейке.

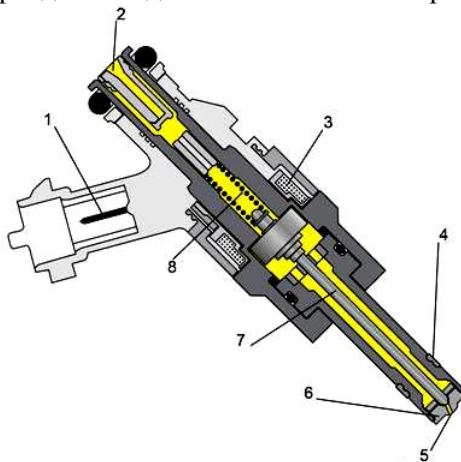


Рис. 7.30. Форсунка высокого давления:

1 – электрический разъем; 2 – впускной канал с сетчатым фильтром; 3 – обмотка электромагнита; 4 – тефлоновое уплотнение; 5 – сопловое отверстие; 6 – седло; 7 – игла распылителя с якорем электромагнита; 8 – пружина

Впрыснутое количество топлива (при данной площади поперечного сечения отверстия) зависит от давления в топливной рейке, противодействия в камере сгорания и продолжительности открытия форсунки. За счет соответствующей геометрии распылителя на конце форсунки достигается очень хорошее распыление топлива.

7.16. Приготовление горючей смеси

Задача образования горючей смеси заключается в том, чтобы приготовить в максимальной степени гомогенную воспламеняемую смесь воздуха и топлива.

При работе двигателя на гомогенной смеси (гомогенная смесь при $\alpha \approx 1,0$, а также гомогенная обедненная смесь) эта горючая смесь должна однородно распределяться по всей камере

сгорания. Напротив, в условиях послойного заряда, горючая смесь гомогенна только в пределах пространственно ограниченной зоны, а в остальных зонах камеры сгорания находится свежий воздух или инертный газ.

Гомогенной может быть газообразная или парообразная топливная смесь только в том случае, если все топливо испарилось. На испарение оказывают влияние несколько факторов:

- температура в камере сгорания;
- размер капель топлива;
- время, которое имеется в распоряжении для испарения топлива.

В зависимости от температуры, давления и геометрии камеры сгорания, воспламеняемая горючая смесь (воздух/бензин) может быть в диапазоне значений $\alpha=0,6...1,6$. При низких температурах топливо испаряется не полностью. Поэтому при этих условиях должно впрыскиваться больше топлива для того, чтобы получить способную к воспламенению смесь.

Для того чтобы получить как можно больше времени для образования гомогенной горючей смеси, топливо должно впрыскиваться как можно раньше.

Поэтому при гомогенном распределении смеси впрыскивание происходит *уже на такте впуска*, и с помощью поступающего воздуха достигается быстрое испарение топлива и хорошая гомогенизация смеси.

Для послойного заряда образование способного к воспламенению облака смеси, которое к моменту зажигания находится вблизи свечи зажигания, имеет решающее значение. Вот почему топливо впрыскивается при такте сжатия таким образом, что возникает облако смеси, которое направляется потоками воздуха в камеру сгорания и отводится движущимся вверх поршнем в зону расположения свечи зажигания. Момент впрыскивания зависит от частоты вращения коленчатого вала и потребности крутящего момента.

Величина капель впрыскиваемого топлива зависит от давления впрыскивания и давления в камере сгорания. С повышением давления впрыскивания можно получить меньший размер капель, которые быстрее испаряются. При постоянном давлении

в камере сгорания так называемая глубина проникновения топлива увеличивается параллельно с ростом давления впрыскивания. Глубина проникновения факела определяется расстоянием, которое проходит отдельная капля топлива до полного испарения.

Если этот пройденный путь превышает расстояние от форсунки до стенки камеры сгорания, то смачиваются стенки цилиндра или поршень (смачивание стенок). Если это топливо не испаряется на стенке цилиндра и поршне до момента зажигания, то либо не происходит воспламенения смеси, либо оно не полное.

При использовании непосредственного впрыскивания топлива известны шесть условий его работы:

- послойное распределение смеси;
- гомогенная смесь;
- гомогенно-обедненная смесь;
- гомогенно-послойное распределение смеси;
- двойной впрыск для защиты двигателя от детонации;
- двойной впрыск для разогрева нейтрализатора.

Эти условия работы позволяют достичь максимальной адаптации к каждому режиму работы двигателя. Переключение режимов работы в процессе движения автомобиля осуществляется без скачков крутящего момента и поэтому не замечается водителем.

На рис. 7.31 представлены характеристики работы двигателя в зависимости от вида распределения смеси в камере сгорания

Линии на диаграмме (рис. 7.31) показывают, какие режимы работы проходит двигатель при сильном ускорении (заметное изменение крутящего момента при начальной неизменной частоте вращения коленчатого вала) и при постепенном ускорении (небольшое изменение крутящего момента при увеличении частоты вращения коленчатого вала).

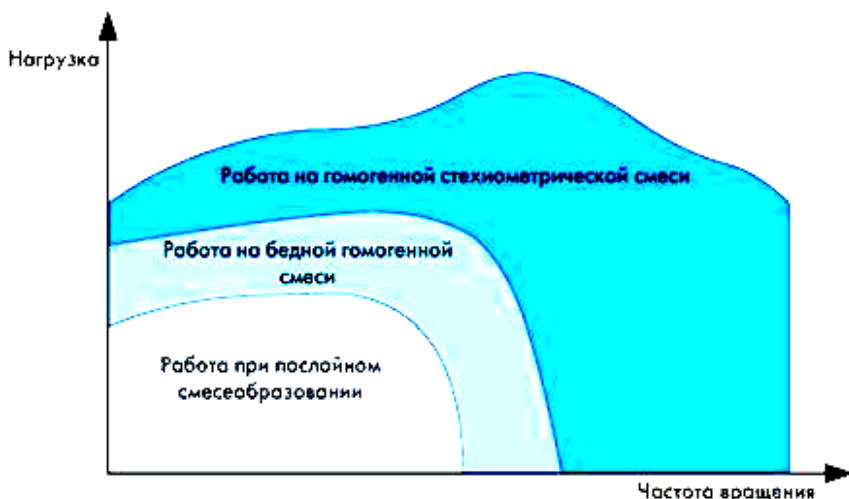


Рис. 7.31. Характеристики работы двигателя в зависимости от вида распределения смеси в камере сгорания

7.16.1. Работа двигателя при послойном распределении смеси

В нижнем диапазоне крутящего момента, примерно при 3000 мин^{-1} , двигатель работает в условиях послойного заряда.

Переход двигателя на режим работы с использованием послойной смеси осуществляется при следующих условиях:

- нагрузка и частота вращения коленчатого вала двигателя соответствуют режимам, на которых эффективно использование послойного смесеобразования;
- системой не зарегистрирована неисправность, из-за которой может повыситься выброс вредных веществ;
- температура охлаждающей жидкости выше 50°C ,
- датчик окислов азота исправен;
- температура накопительного нейтрализатора находится в пределах от 250°C до 500°C .

Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при *послойном распределении смеси* представлены на рис. 7.32.

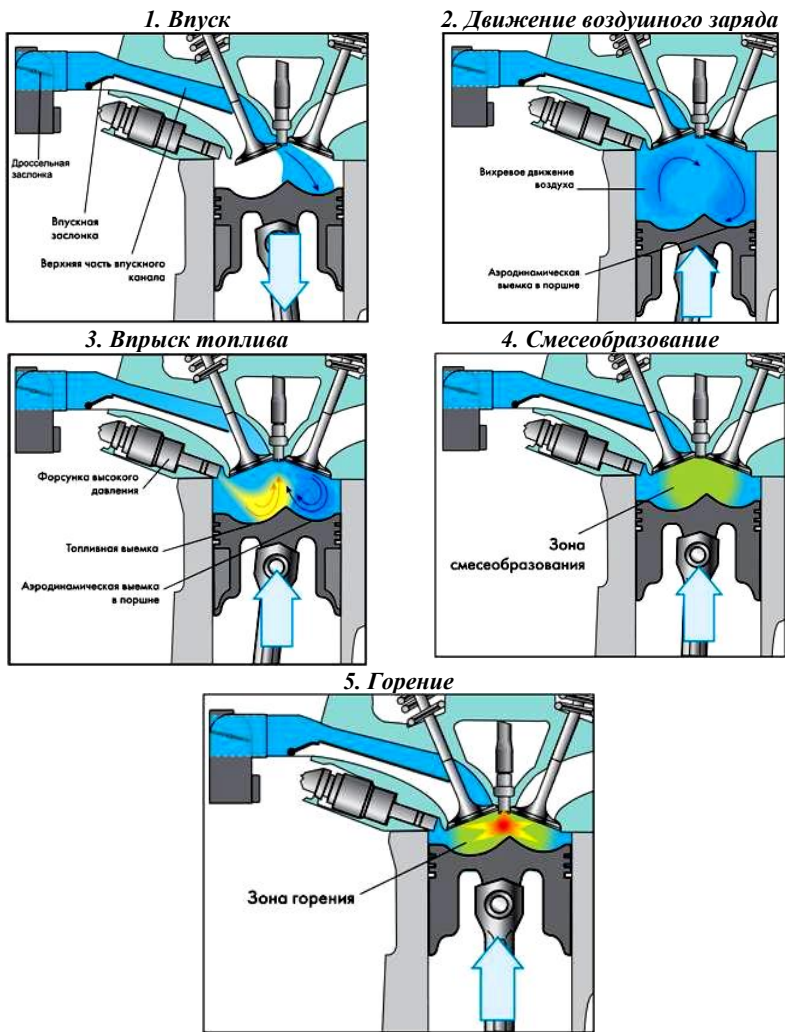


Рис. 7.32. Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при послойном смесеобразовании

7.16.1.1. Процесс впуска

При работе на послышной смеси дроссельную заслонку открывают по возможности больше, чтобы до максимума снизить потери на дросселирование.

При этом установленная во впускном канале вспомогательная заслонка (называемая в дальнейшем *впускной заслонкой*) перекрывает его нижнюю часть. В результате повышается скорость проходящего через верхнюю часть канала потока воздуха, который закручивается затем в цилиндре. Дроссельная заслонка не должна открываться полностью, так как для нормального функционирования адсорбера и системы рециркуляции отработавших газов всегда необходимо определенное разрежение во впускной системе.

7.16.1.2. Движение воздуха в цилиндре двигателя

Специальная форма выемки в днище поршня способствует образованию и усилению вихря в цилиндре двигателя.

7.16.1.3. Впрыск топлива

Топливо впрыскивается в последней трети такта сжатия. Впрыск начинается приблизительно за 60° и заканчивается приблизительно за 45° до ВМТ такта сжатия. Начало впрыска оказывает значительное влияние на расположение облачка смеси относительно свечи зажигания.

Топливо впрыскивается в направлении топливной выемки в поршне. Желаемые размеры облачка смеси достигаются подбором геометрических параметров форсунки.

Специальная форма топливной выемки и движение поршня к ВМТ способствуют отклонению движения капель топлива к свече зажигания. Это движение топлива поддерживается вихревым движением воздуха. В процессе движения к свече зажигания топливо смешивается с поступившим в цилиндр воздухом.

7.16.1.4. Процесс смесеобразования

Для образования послойной смеси предоставляется время, соответствующее повороту коленчатого вала на $40^\circ \dots 50^\circ$. От продолжительности этого процесса зависит способность смеси к воспламенению. Если время между впрыском и моментом подачи искры слишком мало, смесь оказывается не подготовленной к воспламенению. При слишком большом промежутке времени между этими процессами смесь распределяется по всему объему камеры сгорания.

При выполнении указанных выше условий в центре камеры сгорания, т. е. вблизи свечи, образуется легко воспламеняемая смесь. Эта смесь окружена оболочкой, состоящей из свежего воздуха и перепущенных отработавших газов.

Общий коэффициент избытка воздуха в камере сгорания может быть равен при этом от 1,6 до 3.

7.16.1.5. Процесс сгорания

После поступления топливоздушной смеси к свече зажигания она поджигается искрой. При этом воспламеняется только облако смеси, в то время как остальные газы образуют его оболочку. Благодаря изолирующему действию этой оболочки снижаются потери тепла в стенки камеры сгорания и соответственно увеличивается термический КПД двигателя.

Зажигание смеси должно производиться в конце такта сжатия в пределах достаточно узкого угла поворота коленчатого вала, ограниченного моментом окончания впрыска топлива и промежутком времени, необходимого для образования смеси.

Параметры «частота вращения коленчатого вала» и «крутящий момент» определяют ограничения на условия работы при послойном распределении смеси. При слишком большом крутящем моменте образуются частицы сажи за счет локальных зон переобогащенной смеси. При слишком высокой частоте вращения коленчатого вала, за счет высокой турбулентности смеси не может поддерживаться на необходимом уровне послойное рас-

пределение и эффективное перемещение горячей смеси к свече зажигания.

7.16.2. Работа двигателя при гомогенном распределении смеси

При высоком крутящем моменте и высокой частоте вращения коленчатого вала двигатель работает на гомогенной смеси при $\alpha=1,0$.

Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при гомогенном распределении смеси представлены на рис. 7.33.

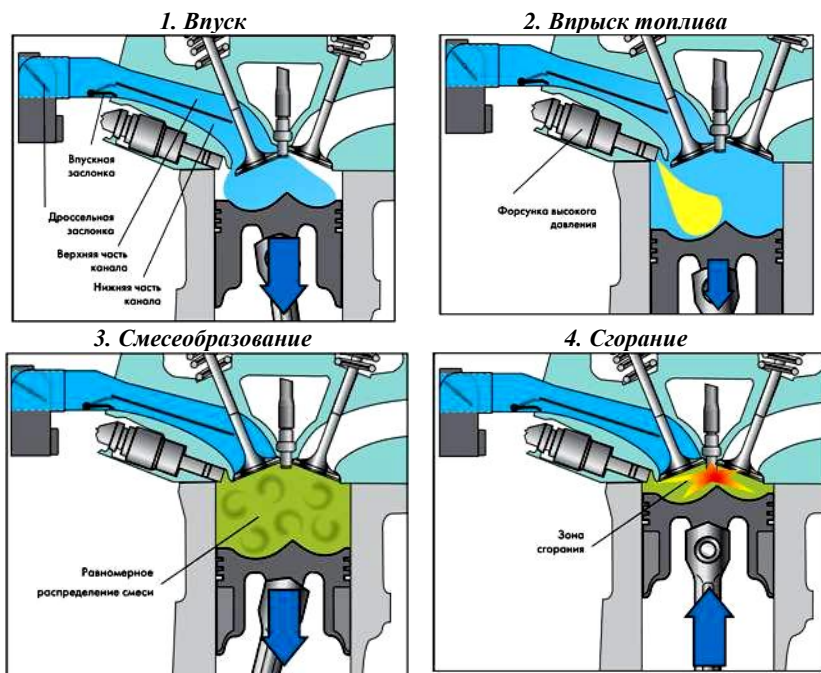


Рис. 7.33. Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при гомогенном распределении смеси

Работу двигателя на гомогенной смеси стехиометрического состава можно сравнить с работой двигателя с впрыском бензина во впускной трубопровод.

Существенное различие заключается только в месте впрыска топлива, который производится в данном случае непосредственно в цилиндры двигателя.

Крутящий момент двигателя может быть изменен как смещением угла опережения зажигания (кратковременно), так и изменением поступающей в цилиндры массы воздуха (долговременно). При этом впрыскивается такое количество топлива, которое необходимо для образования стехиометрической смеси, коэффициент избытка воздуха которой (по определению) равен единице.

7.16.2.1. Процесс впуска

Дроссельная заслонка открывается соответственно перемещению педали акселератора. Впускная заслонка может быть открыта или закрыта в зависимости от режима работы двигателя.

При частичных нагрузках и в среднем диапазоне частот вращения эта заслонка закрыта, в результате чего входящий в цилиндр поток воздуха закручивается, улучшая смесеобразование.

По мере увеличения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала поступление воздуха только через верхнюю часть впускного канала оказывается недостаточным. Поэтому заслонку поворачивают, открывая нижнюю часть впускного канала.

7.16.2.2. Впрыск топлива

Впрыск топлива производится непосредственно в цилиндр на такте впуска приблизительно за 300° до ВМТ такта сжатия.

Необходимое для испарения топлива тепло отбирается у поступившего в цилиндр воздуха, в результате чего этот воздух охлаждается. Благодаря этому можно поднять степень сжатия против ее значения у двигателя с впрыском топлива во впускные каналы.

7.16.2.3. Процесс смесеобразования

Так как впрыск топлива производится на такте впуска, на процесс смесеобразования отводится относительно много времени.

Благодаря этому впрыснутое в цилиндр топливо равномерно распределяется по всему объему поступившего в него воздуха. Коэффициент избытка воздуха смеси в камере сгорания равен единице.

7.16.2.4. Процесс сгорания

Крутящий момент двигателя, расход топлива и выброс вредных веществ при работе на гомогенной смеси зависят от угла опережения зажигания.

7.16.3. Работа двигателя при гомогенно-обедненном распределении смеси

Эта смесь используется на режимах, которые находятся в поле многопараметровой характеристики между режимами работы двигателя при послойном смесеобразовании и режимами его работы на гомогенной смеси стехиометрического состава. Коэффициент избытка воздуха этой смеси равен практически 1,55. Двигатель может эффективно работать на этой смеси при тех же условиях, которые предписаны для послойной смеси.

Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при гомогенно-обедненном распределении смеси представлены на рис. 7.34.

7.16.3.1. Процесс впуска

Как при послойном смесеобразовании, работа двигателя на бедной гомогенной смеси осуществляется с максимально открытой дроссельной заслонкой при закрытых впускных заслонках. При этом снижаются потери на дросселирование и создается интенсивное движение воздуха в цилиндре двигателя.

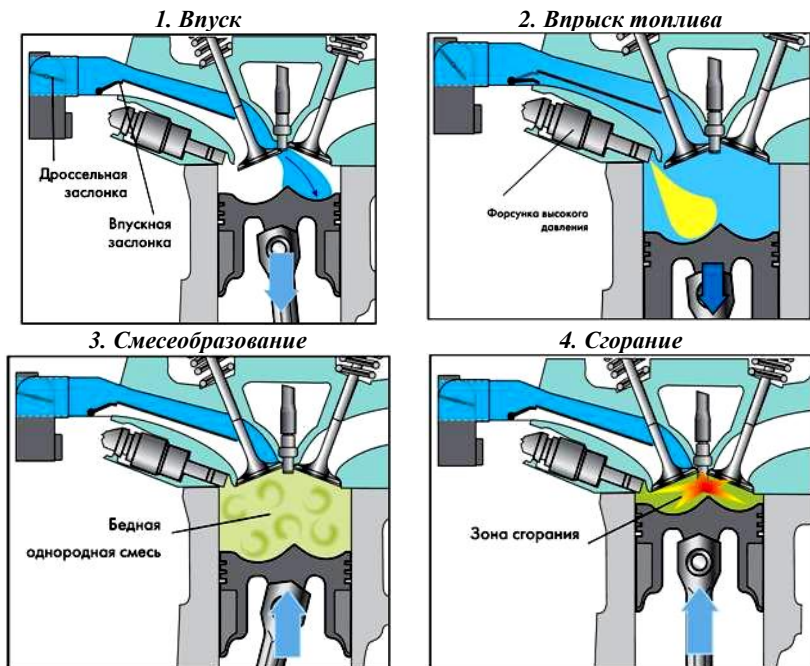


Рис. 7.34. Процессы смесеобразования и сгорания двигателя с непосредственным впрыском бензина при гомогенно-обедненном распределении смеси

7.16.3.2. Процесс впрыска топлива

Впрыск топлива осуществляется непосредственно в цилиндр в процессе впуска. Он начинается приблизительно за 300° до ВМТ такта сжатия. При этом блок управления двигателем регулирует подачу топлива таким образом, чтобы коэффициент избытка воздуха был равен приблизительно $1,55$.

7.16.3.3. Процесс смесеобразования

Благодаря раннему моменту впрыска предоставляется достаточно большое время до момента зажигания для образования гомогенной смеси во всем объеме камеры сгорания.

7.16.3.4. Процесс сгорания

Как и при работе на любой гомогенной смеси момент зажигания не зависит от процесса смесеобразования. Смесь горит при этом во всем объеме камеры сгорания.

7.17. Форкамерно-факельное зажигание

Применение расслоения заряда использованием разделенных камер сгорания показано на примере карбюраторного двигателя с форкамерно-факельным зажиганием (рис. 7.35).

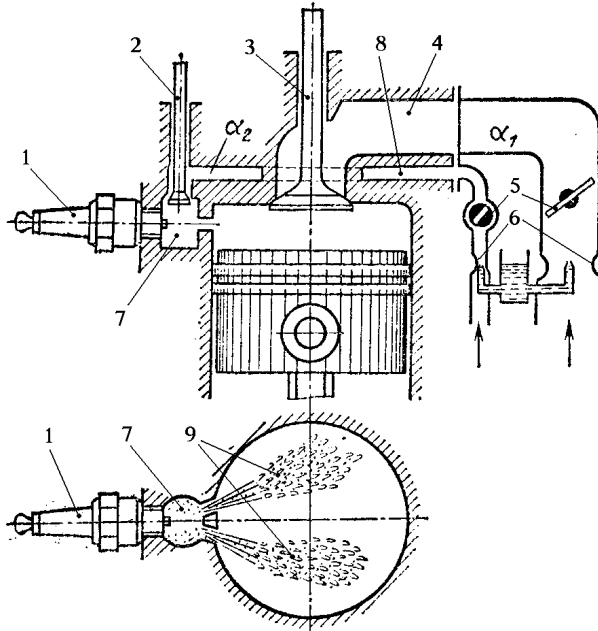


Рис. 7.35. Схема двигателя с форкамерно-факельным зажиганием
1 — свеча зажигания; 2 — впускной клапан форкамеры; 3 — впускной клапан; 4 — впускной канал; 5 — дроссельные заслонки; 6 — карбюратор; 7 — форкамера; 8 — впускной канал форкамеры; 9 — горящий факел.

В двигателе с форкамерно-факельным зажиганием форкамера 7 через дополнительную впускную систему, питаемую особой секцией карбюратора, продувается обогащенной смесью

(благодаря чему практически полностью удаляются остаточные газы). В ней расположена свеча зажигания и дополнительный клапан. В форкамеру подается смесь, чтобы в результате смешения с обедненной смесью, поступающей из цилиндров в процессе сжатия, в форкамере образовалась смесь с $\alpha = 0,6 \div 0,8$ наиболее подходящего состава для воспламенения. В этом случае, при значительном обеднении смеси в цилиндре, в форкамере всегда поддерживается состав смеси, благоприятный для воспламенения. Рабочая смесь обедненного состава подается в основную камеру сгорания. Воспламенение смеси в цилиндре горящим факелом приводит к тому, что с достаточно высокими скоростями горят сильно обедненные смеси ($\alpha = 1,7 \div 1,8$).

Сгоревшие и продолжающие гореть активные пламенные газы выбрасываются в основную камеру сгорания. Таким факелом можно поджечь сильно обедненную смесь с $\alpha = 1,5 \div 1,6$. Воспламеняются и более бедные смеси, однако достаточно быстрое сгорание происходит в зоне факелов, дальнейшее догорание затягивается.

Расход топлива уменьшается в среднем на 10...15% на эксплуатационных режимах. $V_{\text{форкамеры}} = 3 \div 4\% V_c$.

Состав смеси в форкамере можно приблизительно подсчитать по формуле:

$$\frac{1}{\alpha_{\phi}} = \frac{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\varepsilon - 1}{\alpha_1}}{\varepsilon}$$

При $\varepsilon=8$ и $\alpha_1=1,50$ для получения $\alpha_{\phi}=0,7$ необходимо заполнить форкамеру смесью $\alpha=0,15$. Для более точных расчетов необходимо учитывать гидравлические потери в сопловых отверстиях и степень сжатия, отвечающую моменту подачи искры.

Регулярность воспламенения и скорость сгорания в форкамерах оказываются очень высокими, это позволяет в довольно широких пределах использовать качественное регулирование обеднением смеси при полном открытии дроссельной заслонки.

Дросселирование двигателя начинается при $\alpha_{\Sigma} \approx 1,50$ ($N_e \approx 0,65 N_{e, \max}$), такой же состав смеси сохраняется и на меньших нагрузках, на режиме холостого хода смесь несколько обогащается до $\alpha_{\Sigma} \approx 1,20$. Это приводит к экономии топлива на частичных

нагрузках, экономия топлива в условиях эксплуатации в среднем на 10% при усложнении конструкции двигателя и карбюратора.

Однако при форкамерно-факельном зажигании концентрация NO_x на режимах, близких к максимальным, больше, чем при обычном зажигании. Высокие концентрации NO_x в ОГ объясняются большей скоростью сгорания и незначительным расслоением топливоздушнной смеси из-за малого объема форкамеры. Содержание C_nH_m на режимах малых нагрузок и холостого хода также больше. Концентрация CO в таком двигателе намного меньше (так как работа происходит на сильно обедненной смеси). Максимум NO_x соответствует $\alpha=1,15$.

Кроме того, к недостаткам двигателя с форкамерно-факельным зажиганием следует отнести усложнение конструкции двигателя и карбюратора, а также повышенную жесткость работы на больших нагрузках.

Токсичность форкамерных двигателей.

- Основные эксплуатационные режимы ($\alpha=1,4\div 1,6$): выбросы NO_x и CO снижаются;
- Режимы больших нагрузок ($\alpha=1,1\div 1,2$); выбросы NO_x несколько выше;
- На режимах холостого хода; выбросы C_nH_m увеличиваются из-за появления пропусков воспламенения. Для устранения этого в форкамере можно установить футорку.

7.18. Расширение многотопливности автомобильных дизелей

Удовлетворительно решить проблему многотопливности в принципе позволяет только дизельный процесс, организованный таким образом, чтобы смесеобразование непосредственно сопутствовало сгоранию.

Основные трудности это – высокая испаряемость и плохая самовоспламеняемость легких топлив, особенно для высокооктановых бензинов:

- **на режимах больших нагрузок**, т.е. при высоких температурах поршней и других деталей, применение высокооктановых легких топлив приводит к существенному уве-

личению задержек воспламенения \Rightarrow большое количество однородной смеси \Rightarrow самовоспламенение взрывного типа \Rightarrow ударные волны;

- на режимах малых нагрузок и холостом ходу двигатель вообще не может работать (пропуски воспламенения).

В дизелях с открытыми и полуразделенными камерами сгорания некоторого улучшения удается достигнуть уменьшением угла опережения впрыска, что способствует сокращению периода задержки воспламенения с ухудшением экономичности из-за переноса большей части сгорания в такт расширения, однако работа двигателя остается очень жесткой.

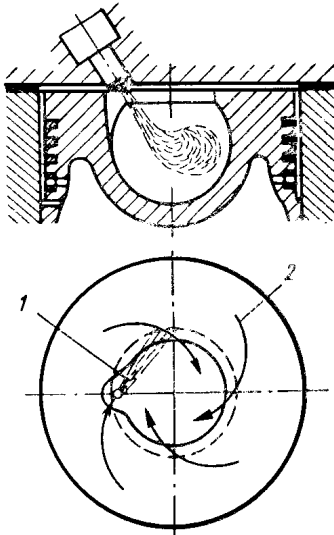


Рис. 7.36. Схема М-процесса
1 – топливная струя;
2 – направление воздушных потоков

Другой путь состоит в повышении ε , например, в многотопливной модификации дизеля с М-процессом до $\varepsilon=22$ (см.рис. 7.36). Это позволяет использовать бензин с $ОЧ \approx 72 \div 76$.

В дизелях с разделенными камерами сгорания, предкамерных, за счет использования очень горячих вставок, температура которых достигает 750°C и выше, при одновременном повышении ε удается получить мягкую работу на высокооктановых бензинах. Пуск осуществляется при помощи калильных свечей, установленных в предкамерах.

7.19. Применение на автомобилях использование принудительного зажигания в дизелях

Радикальное решение проблемы воспламенения в дизеле в отдельный момент по фазе цикла дает применение искрового зажигания. Дизели фирмы MAN используют FM-процесс. Дизели Дейтце (Deitz) имеют пристеночное смесеобразование. Свеча отключается когда это нужно.

Использование электрозажигания в дизеле, как вспомогательного средства для обеспечения оптимального момента воспламенения топлива вне зависимости от цетанового числа приводит к тому, что мощностные и экономические показатели двигателя остаются практически постоянными при работе на дизельном топливе и бензинах различных сортов. Этому способствует наличие пристеночного смесеобразования, при котором скорость сгорания определяется взаимной диффузией паров топлива и воздуха.

7.20. Применение на автомобилях многофазная подача топлива

Весомая часть способов совершенствования дизелей с целью улучшения их экологических показателей относится к топливоподаче и топливоподающей аппаратуре.

Оптимизация топливной подачи означает более полное сгорание и повышение КПД, а также уменьшение вредных примесей в ОГ.

Определение оптимальной характеристики впрыска является сегодня приоритетным. Все современные дизельные топливоподающие системы имеют возможность управлять формой этой характеристики и разделять дозы впрыскиваемого топлива на несколько частей с регулированием фазового интервала между ними в течение одного цикла.

Многофазный впрыск оказывает важное влияние на экологические и экономические параметры дизеля. Применение пилотного (предварительного) впрыска (впрыскивается сверхмалый объем топлива ($1...3 \text{ мм}^3$) перед подачей основной дозы топлива) позволяет снизить период задержки воспламенения. В

течение пилотного впрыска протекают предпламенные химические реакции, а видимое сгорание отсутствует. При отсутствии предварительного впрыска воспламенение в цилиндре происходит с большей задержкой и поступившее топливо во всем объеме камеры сгорания воспламеняется одновременно во многих местах. Такой рабочий процесс имеет повышенное содержание NO_x в отработавших газах. Поэтому снижение задержки воспламенения с помощью предварительного впрыска ведёт к тому, что тепловыделение в фазе быстрого сгорания происходит более плавно, по мере поступления топлива в цилиндр. Подбором оптимальных параметров предварительного впрыска на большинстве режимов можно заметно снизить содержание NO_x в отработавших газах и уровень шума дизеля, не ухудшив при этом его топливную экономичность.

В современных дизелях многофазная характеристика впрыскивания может включать от 4 до 6 фаз впрыска топлива, а в опытных образцах – до 12 фаз за один рабочий цикл.

Многофазная характеристика впрыска представлена на рис. 7.37.

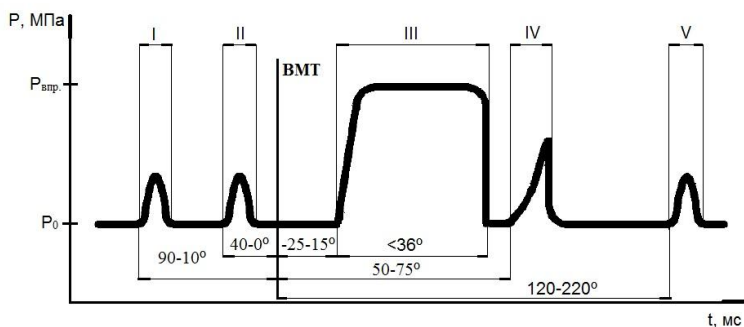


Рис. 7.37. Многофазная характеристика впрыскивания:

I - раннее предварительное впрыскивание; II - ближнее предварительное впрыскивание; III- основное впрыскивание; IV- ближний подвпрыск; V - поздний подвпрыск

На многофазной характеристике впрыска можно выделить следующие характерные участки (рис. 7.37):

1. Ранний (первый) предварительный впрыск сверхмалых объёмов топлива для снижения периода задержки воспламенения, уровня шума и выбросов NO_x . Осуществляется в диапазоне от 90° до 10° перед ВМТ.

2. Поздний (ближний) предварительный впрыск малой дозы топлива для снижения эмиссии токсичных компонентов ОГ и уменьшения шума процесса сгорания. Момент впрыскивания этой дозы – от 40° перед ВМТ до 0° .

3. Основной впрыск. Подача основной дозы топлива происходит в пределе 36° поворота коленчатого вала. Момент начала основного впрыскивания – в диапазоне от 25° перед ВМТ до 15° после ВМТ.

4. Короткое интенсивное (ближнее) поствпрыскивание для интенсификации окисления продуктов неполного сгорания топлива на завершающих стадиях рабочего процесса в цилиндре, а также в окислительном нейтрализаторе. Момент начала впрыскивания устанавливается в диапазоне $50 \dots 75^\circ$ после ВМТ.

5. Поздний подвпрыск (на такте выпуска) для повышения рабочей температуры каталитического нейтрализатора. Он осуществляется через $120 \dots 220^\circ$ после ВМТ. Проблема организации данного подвпрыска топлива заключается в его малой дозе, что накладывает ограничения на систему управления дизелем в целом. Поздний подвпрыск периодически применяется также для очистки (выжигания сажи) сажевого фильтра.

7.21. Применение на автомобилях система изменения фаз газораспределения (VTC)

Система изменения фаз газораспределения (VTC - Variable Timing Control) позволяет изменять фазы газораспределения в зависимости от условий работы, для получения максимальной мощности и уменьшения токсичности отработавших газов.

Схема системы VTC представлена на рис. 7.38.

Система VTC изменяет фазы газораспределения посредством изменения углового положения распределительного вала впускных клапанов. Основным отличием от системы VTEC, которая также изменяет фазы газораспределения, является то, что

система VTC изменяет фазы газораспределения постоянно, в зависимости от условий работы.

На рис. 7.39 показано, что момент открытия впускного клапана изменяется на 50 градусов в сторону опережения. Эта величина может варьироваться в пределах 25–50 градусов, так, на автомобилях Honda Integra это 50 градусов, на автомобилях Honda Element–25 градусов.

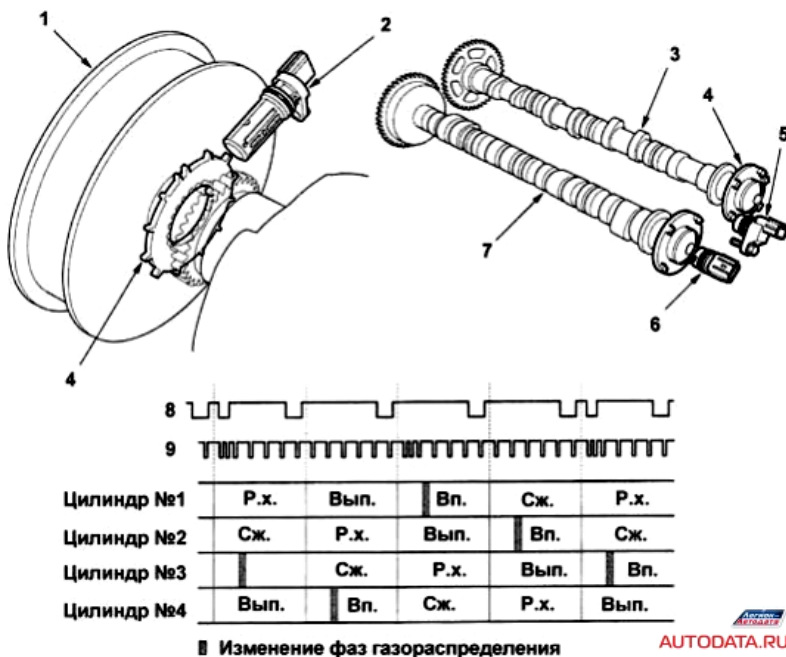


Рис. 7.38. Схема системы изменения фаз газораспределения (VTC):

1 – шкив коленчатого вала, 2 – датчик положения коленчатого вала, 3 – распределительный вал выпускных клапанов, 4 – задатчик, 5 – датчик положения распределительного вала выпускных клапанов, 6 – датчик положения распределительного вала впускных клапанов, 7 – распределительный вал впускных клапанов, 8 – сигнал датчика положения распределительного вала, 9 – сигнал датчика положения коленчатого вала

При большом угле перекрытия клапанов, уменьшаются насосные потери, в результате увеличивается топливная экономичность. Также имеет место "эффект рециркуляции отработавших газов" – (EGR effect)*, в результате чего уменьшается температура сгорания в соответствии с увеличением доли отработавших газов, что приводит к уменьшению выбросов окислов азота (NO_x) и углеводородов (C_nH_m).

EGR effect, в данном случае можно соотнести с термином остаточных газов. Данный эффект достигается организацией закрутки потоков, таким образом, чтобы часть отработавших газов поступала обратно в камеру сгорания.

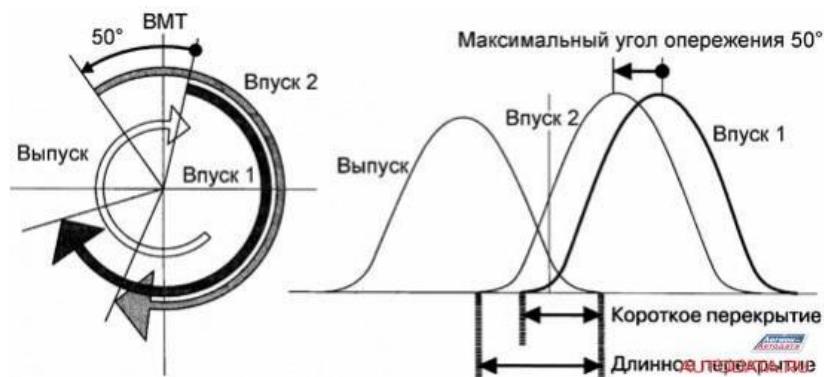


Рис. 7.39. Регулирование фаз газораспределения системой VTC

Работа системы VTC показана на рис. 7.40.

На режимах холостого хода система управления уменьшает перекрытие клапанов, для стабильности сгорания и уменьшения частоты вращения. В случае неисправности системы VTEC, управление системой VTC прекращается, и газораспределительный механизм работает по обычной классической схеме. Фазы газораспределения впускных клапанов регулируются по программе, заложенной в блоке управления. Регулировка осуществляется с помощью муфты системы изменения фаз газораспределения (VTC), установленной на распределительном вале впускных клапанов и электропневмоклапана системы изменения фаз газораспределения (VTC). В зависимости от необходимости

увеличения или уменьшения времени открытия впускных клапанов электропневмоклапан подает масло под давлением в отверстие для управления опережением или в отверстие для управления запаздыванием в муфте (рис. 7.40). Муфта действует на распределительный вал выпускных клапанов, в результате чего впускные клапана открываются либо раньше, либо позже.

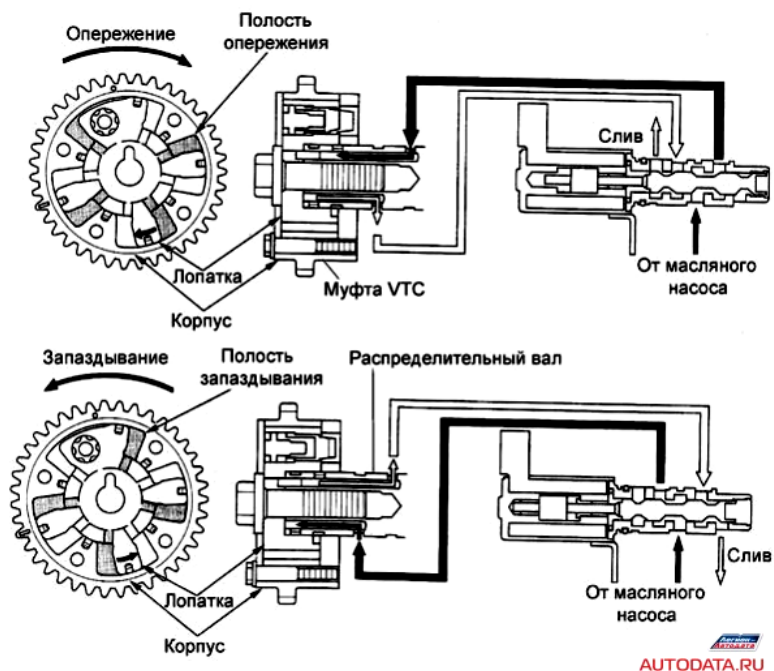


Рис. 7.40. Работа системы VTC

7.22. Применение на автомобилях рециркуляция отработавших газов

Рециркуляция отработавших газов (ОГ) заключается в перепуске их части во впускную систему двигателя и последующему возврату в камеры сгорания. Так как ОГ содержат после процесса сгорания очень мало кислорода, максимальные темпе-

ратура и давление при сгорании топлива снижаются. В результате этого уменьшается выброс оксидов азота – NO_x .

Эффект рециркуляции, снижающий уровень эмиссии NO_x , основывается на трех составляющих:

- снижении концентрации кислорода в камере сгорания;
- сокращении расхода OG ;
- снижении температуры в цилиндре благодаря более высокой теплоемкости инертных газов, которые не участвуют в реакции (например, CO_2).

Количество отработавших газов, участвовавших в рециркуляции, может достигать 20...50% общего расхода, при этом содержание окислов азота снижается до 60%. Увеличение выбросов углеводородов и роста расхода топлива при увеличении неравномерности работы двигателя накладывают ограничения на верхний предел степени рециркуляции отработавших газов. Система рециркуляции *выключается* при работе двигателя на холостом ходу, потому что образование окислов азота на этом режиме незначительно. На режимах полных нагрузок или близких к ним, рециркуляция осуществляется непродолжительное время, а в режиме частичных нагрузок более длительное время и эффективность действия системы на этом режиме наивысшая.

Рециркуляция подразделяется на:

- внутреннюю;
- внешнюю.

При *внутренней рециркуляции* отработавших газов регулирование количества остаточных газов в цилиндрах двигателя производится перестановкой по фазе впускных и выпускных валов. Это создает условия для поступления отработавших газов из выпускных во впускные каналы во время перекрытия фаз газораспределения (т. е. в период одновременного открытия впускного и выпускного клапанов). При этом количество рециркулируемых газов зависит главным образом от продолжительности перекрытия фаз. Для этого впускные клапаны должны открываться задолго до ВМТ, а выпускные – закрываться непосредственно перед ВМТ. В результате оба клапана остаются открытыми одновременно и отработавшие газы перетекают во впускные каналы. К преимуществам внутренней рециркуляции

отработавших газов по сравнению с внешней рециркуляцией относятся ускоренная реакция системы и повышенная равномерность распределения рециркулируемых газов по цилиндрам.

Схема системы внешней рециркуляции ОГ представлена на рис. 7.41.

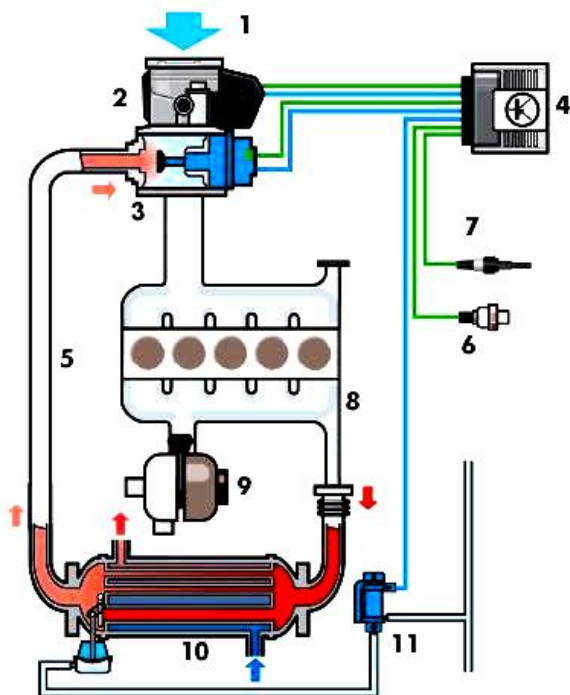


Рис. 7.41. Схема системы рециркуляции отработавших газов дизельного двигателя:

1 – всасываемый воздух; 2 – заслонка впускного коллектора с датчиком положения заслонки и двигателем; 3 – клапан рециркуляции ОГ; 4 – блок управления двигателем; 5 – подводящая магистраль ОГ; 6 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 7 – лямбда-зонд; 8 – выпускной коллектор; 9 – турбонагнетатель; 10 – радиатор охлаждения ОГ; 11 – переключающий клапан радиатора рециркуляции

Принцип работы системы основан на перепуске части ОГ во впускной трубопровод. После этого они, смешиваясь с воздухом или топливовоздушной смесью, повторно участвуют в го-

рении. Определенная часть ОГ, пройдя клапан рециркуляции 3, разбавляет свежую топливовоздушную смесь или воздух. Управление клапаном рециркуляции осуществляется с помощью электронного блока управления 4 двигателя, как правило, общего с системой питания, АБС и т. д.

Количество рециркулируемых ОГ зависит от частоты вращения двигателя, количества впрыскиваемого топлива, объема всасываемого воздуха, температуры и давления всасываемого воздуха.

Блок управления двигателем определяет с помощью измерителя расхода поступающую в цилиндры массу воздуха и рассчитывает соответствующее ее величине давление во впускном трубопроводе. При рециркуляции ОГ их масса добавляется к массе свежего воздуха и соответственно повышается давление во впускном трубопроводе. Датчик давления во впускном трубопроводе реагирует на это изменением напряжения на его выходе, которое передается на вход блока управления двигателем.

По величине этого сигнала определяется суммарное количество воздуха и ОГ, поступающих в цилиндры двигателя. Количество перепускаемых ОГ определяется вычитанием количества свежего воздуха из суммарной величины.

В магистрали ОГ перед сажевым фильтром расположен широкополосный лямбда-зонд 7, сигнал которого используется в качестве корректирующей величины для регулировки количества рециркулируемых ОГ. Если доля кислорода в ОГ отличается от заданного параметра характеристики рециркуляции ОГ, то блок управления двигателя 4 посылает сигнал управления на клапан рециркуляции 3 и, соответственно, изменяет количество рециркулируемых ОГ. Радиатор 10 системы рециркуляции ОГ охлаждает рециркулируемые ОГ. Благодаря этому происходит дополнительное снижение температуры сгорания и обеспечивается возможность рециркуляции большего количества ОГ.

Однако независимое от теплового состояния двигателя охлаждение рециркулируемых газов приводит к повышенному выбросу углеводородов и оксида углерода. Поэтому в системе рециркуляции применяют переключающий клапан радиатора рециркуляции 11, который в зависимости от температуры охла-

ждающей жидкости (обычно ниже 50°C) направляет отработавшие газы к радиатору или в обход его.

7.23. Применение на автомобилях каталитической нейтрализации система SCR

Технология SCR (Selective Catalytic Reduction – избирательная каталитическая нейтрализация) имеет важные преимущества: высокий коэффициент полезного использования топлива и устойчивость к воздействию диоксида серы. Она получила широкое распространение в Европе и других развитых странах в качестве эффективного способа контроля выхлопных газов дизельных автомобилей.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ SCR-ТЕХНОЛОГИИ

Технология SCR используется достаточно широко и применяется, главным образом, для устранения окислов азота NO_x из выхлопных газов. Чтобы эффективно преобразовывать NO_x в азот при относительно низких температурах, в систему SCR должен входить подходящий восстановитель и катализатор. Для восстановления NO_x в азот можно использовать либо аммиак, либо мочевины. Аммиак представляет собой одно из наиболее ядовитых химических соединений, так что использование его нежелательно, но возможно использование реагента, который мог бы высвободить аммиак в нужный момент и в нужных количествах. В качестве такого реагента обычно применяют мочевины, которая нетоксична, не имеет выраженного вкуса и обладает другими полезными свойствами.

Схема функционального взаимодействия блока управления двигателем EDC17 и SCR-модуля DeNOx2.2 показана на рис. 7.42.

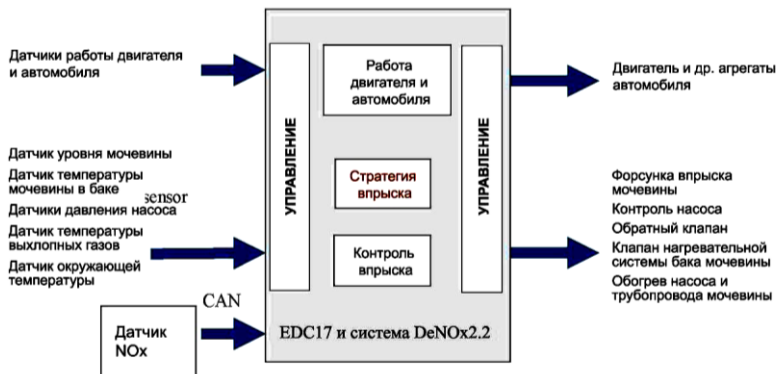


Рис. 7.42. Принципиальная схема работы EDC17 и DeNOx2.2

Принцип работы SCR-технологии состоит в следующем: выхлопные газы направляются турбонагнетателем в выпускной тракт, согласованным образом в выпускном тракте через специальную форсунку распыляются порции раствора мочевины, капельки мочевины нагреваются выхлопными газами и входят в реакции гидролиза и пиролиза с выходом аммиака NH_3 , и уже высвободившийся NH_3 избирательным образом на специальном катализаторе восстанавливает NO_x к азоту N_2 , уравнения реакции приведены на рис. 7.43. Иногда, дополнительные каталитические решетки устанавливаются за SCR катализатором, обеспечивающим переход аммиака в чистый азот, с целью избежать утечек аммиака, которые могли бы составить вторичное загрязнение.

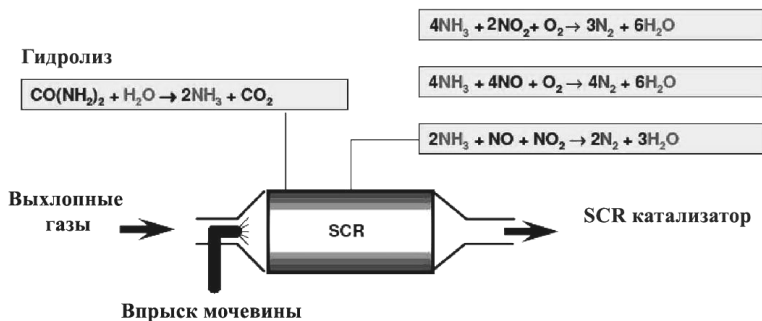
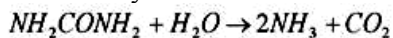
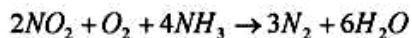
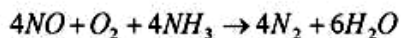
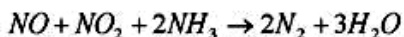


Рис. 7.43. Принципиальная схема SCR-технологии

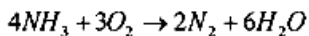
Мочевина (NH_2CONH_2) в присутствии воды распадается при высокой температуре на NH_3 и CO_2 , реакция не требует специальных каталитических условий



Получающийся аммиак NH_3 и NO , NO_2 , содержащиеся в выхлопных газах, взаимодействуют на SCR-катализаторе с образованием азота и воды:



С целью предотвратить возможные утечки аммиака дополнительный катализатор, обеспечивающий окисление аммиака иногда устанавливается сразу за SCR-катализатором – на выходе получается азот и вода



УСТРОЙСТВО SCR-СИСТЕМЫ

SCR-система состоит из каталитического конвертора (SCR-глушитель), магистрали доставки мочевины (модуль подачи SM), устройства дозированного впрыска мочевины (дозировочный модуль DM), бака для мочевины, контроллера модуля подачи DCU (Dosing Control Unit), соответствующих трубопроводов и проводов. Схематически система изображена на рис. 7.44.

Система DeNOx состоит из двух частей:

- модуль подачи (SM);
- дозировочный модуль (DM).

DCU модуля подачи интегрирован в ECU (Electronic Control Unit – основной контроллер двигателя), так что работа насоса подачи мочевины и связанных с ним устройств, контролируется управляющими сигналами из ECU. Модуль подачи (SM) включает в себя насос, клапан, фильтрующий элемент, датчик давления, которые заключены в общую оболочку, безопасную для окружающей среды. Дозирующий модуль (DM) включает в себя PWM-управляемый дозирующий клапан-форсунку (PWM –

Pulse Width Modulation), расположенный на входе в SCR – катализатор. Контроллер, взаимодействуя с ECU, получает текущие параметры работы двигателя, использует полученные сигналы о температуре на катализаторе и др., вычисляет объем мочевины для впрыска и контролирует работу форсунки, осуществляющей впрыск соответствующего объема в выхлопной тракт.

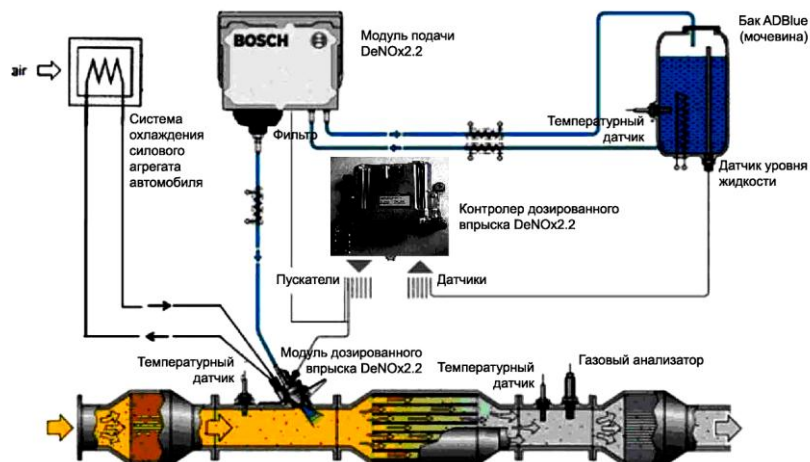


Рис. 7.44. Принципиальная схема системы DeNOx2.2

Форсунка (модуль DM) установлена в выхлопном тракте, ее рабочая температура поддерживается охлаждающей жидкостью двигателя автомобиля. Назначение форсунки – отмерить и распылить в выхлопном тракте мочевины согласно команде контроллера. При контакте с высоко нагретыми выхлопными газами в выхлопном тракте мочевина разлагается на аммиак и воду, перемешивается с выхлопными газами и попадает в SCR-конвертор. В каталитическом конверторе NH_3 взаимодействует с NO_x с образованием азота и воды, которые выбрасываются в атмосферу.

КАТАЛИТИЧЕСКИЙ КОНВЕРТОР

Основное назначение каталитического конвертора – обеспечить катализ реакции восстановления окислов азота NO_x , не допустить утечек аммиака и уменьшить шум, исходящий от двигателя, так что *устройство* одновременно является SCR катализатором и глушителем двигателя. Оно включает в себя 6 основных частей: *оболочку, магистраль глушителя, внутреннюю перегородку, демпферы, несущую конструкцию катализатора и собственно катализатор*. Внешняя оболочка служит физической границей потока выхлопных газов, ее форма и структурное устройство должны учитывать требования аэродинамики, с одной стороны, а с другой – обеспечивать каталитической системе наиболее полную очищающую способность; магистраль глушителя включает в себя входной и выходной трубопроводы выхлопных газов, при этом собственно эффект глушения достигается перемешиванием выхлопных газов. Внутренняя перегородка служит опорой для несущей конструкции катализатора, с одной стороны, и перегородкой для выхлопных газов – с другой; демпферы поглощают ударные нагрузки, несущая конструкция обеспечивает равномерное распределение катализатора в объеме конвертора, катализатор является центральным компонентом SCR-системы. Реагенты NH_3 и NO_x достигают каталитической поверхности вместе с потоком газов, активируются катализатором и разлагаются на азот N_2 и воду H_2O , таким образом, происходит сокращение окислов азота NO_x в составе выбросов.

Основные компоненты SCR-системы показаны на рис. 7.45.

Контейнер из нержавеющей стали содержит внутри себя SCR-катализатор и систему глушителя; теплоизоляционный материал проложен вдоль нижней панели контейнера: рабочая температура здесь может достигать 200°C.

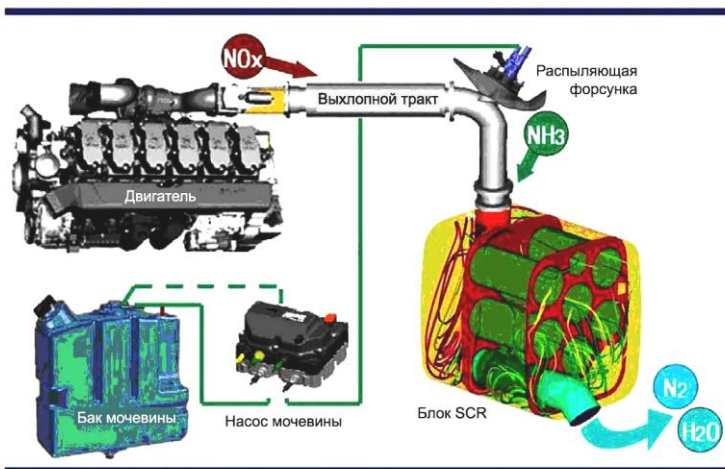


Рис. 7.45. Основные компоненты SCR-системы

На рис. 7.46 и 7.47 представлены устройство и внешний вид SCR-блока. Магистраль с фланцем – впускная, а другая магистраль, простая – выпускная. Монтажные отверстия для температурных датчиков имеются как перед входом в каталитическую систему, так и после нее, но система DeNOx2.2 предусматривает установку только одного температурного датчика - перед катализатором.

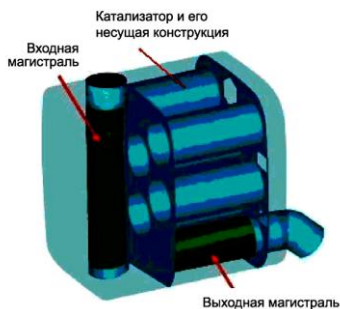


Рис. 7.46. Внутреннее устройство SCR-блока дизельного двигателя WP12

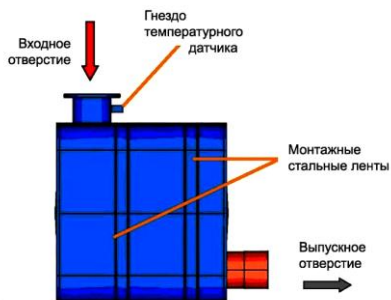


Рис. 7.47. Внешний вид SCR-блока дизельного двигателя WP12

Использование системы SCR вместо системы EGR (система рециркуляции выхлопных газов) имеет следующие *преимущества*:

- Большая выходная мощность мотора при одинаковом объеме мотора;
- Уменьшение количества NO_x в выхлопных газах до 90%;
- Уменьшение количества HC и CO в выхлопных газах до 50%;
- Уменьшение количества сажевых частиц в выхлопных газах до 50%.

Использование системы SCR вместо системы EGR имеет следующие *недостатки*:

- встроенный резервуар для хранения необходимого количества мочевины;
- малое количество заправочных пунктов;
- увеличение затрат владельца на обслуживание транспортного средства за счет необходимости постоянно заправлять бак мочевины и иметь достаточное количество раствора карбамида при поездках на большие расстояния;
- дорогостоящий ремонт любого компонента системы.

Преимущества использования *мочевины*:

- сокращение количества оксида азота до 95%;
- упрощение системы управления и контроля за выхлопными газами;
- повышение эффективности работы дизельного двигателя (приблизительно на 3%).

7.24. Применение впрыска воды к воздуху или топливу

Эффективность добавления воды к воздуху или топливу исследуется уже в течение ряда лет. Применение воды рассматривается с точки зрения уменьшения окислов азота NO_x, снижение которых является наиболее трудной задачей.

Добавление воды к топливовоздушному заряду приводит к снижению максимальной температуры цикла, что обусловлено затратами на испарение воды, нагрев ее паров (удельная тепло-

ёмкость водяного пара выше теплоёмкости воздуха). С этой точки зрения механизм воздействия впрыска воды на снижение выброса NO_x аналогичен рециркуляции ОГ.

Присадка воды к воздуху может быть осуществлена впрыском воды во впускной трубопровод или непосредственно в цилиндр.

Впрыск в цилиндр значительно усложняет систему впрыска, однако позволяет осуществлять подачу воды в локальные объемы заряда, что может дать больший эффект в снижении выделения NO_x . При впрыске во впускной трубопровод, кроме этого, происходит увеличение коэффициента наполнения η_v из-за некоторого охлаждения воздуха (смеси) на впуске в цилиндр.

Таким образом, впрыск воды повышает ОЧ бензина, что противодействует детонационному сгоранию, при котором выброс NO_x увеличивается в среднем на 100%.

Добавление воды к бензину более резко повышает его октановое число, чем впрыск воды во впускной трубопровод. Кроме того, исследования показали, что кислород воды, содержащейся в эмульсии, участвует в процессе сгорания.

Изменение октанового числа от добавления воды к бензину и впрыска воды во впускной трубопровод представлено на рис.7.48. (1 – добавка воды к топливу; 2 – впрыск воды во впускной трубопровод).

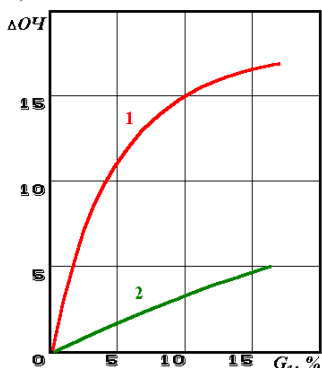


Рис. 4.48. Изменение ОЧ от процентного содержания воды:
1 – добавка воды к топливу; 2 – впрыск воды во впускной трубопровод

Относительное уменьшение количества NO_x , выделяемого дизелями в зависимости от количества впрыскиваемой воды представлено на рис. 7.49.

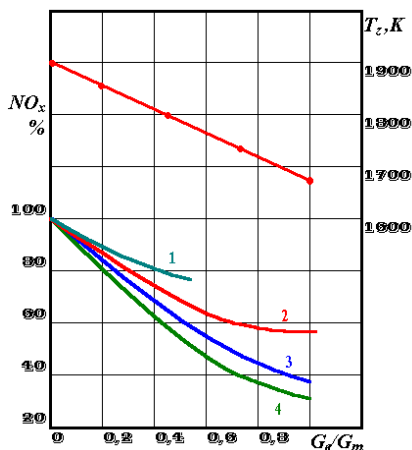


Рис. 7.49 Уменьшение выделения NO_x от количества впрыснутой воды

Кривые 1 и 2 – дизель с неразделенной камерой сгорания; 1 – добавка воды к топливу; 2 – впрыск воды во впускной трубопровод. Анализ кривых показывает, что впрыск воды во впускной коллектор для дизелей с неразделенной камерой сгорания больше влияет на концентрацию NO_x , чем добавление воды к топливу. Кривые 3 и 4 – дизель с предкамерным

смесеобразованием и впрыском воды во впускной коллектор при различных нагрузках (различных α). 4 – при меньших α (при большей нагрузке).

Из графика следует, что большую эффективность на выбросы NO_x впрыск воды оказывает на больших нагрузках. В дизеле с М-процессом при добавлении воды концентрация NO_x не изменяется, что можно объяснить интенсивным испарением воды и топлива вследствие высокой температуры поверхности КС.

Дымность и CO при впрыске воды в воздух и при добавлении ее к топливу уменьшаются. Концентрация C_nH_m в ОГ при этом увеличивается, что объясняется увеличением периода задержки воспламенения при обоих способах воспламенения воды.

В заключение стоит отметить, что при работе на топливозодушных смесях (эмульсиях) удельный эффективный расход топлива может несколько уменьшаться. Уменьшение расхода топлива наблюдается при содержании в нём 7...15% воды и не

превышает 4%. Однако при этом срок службы деталей топливной аппаратуры и ЦПГ значительно уменьшается.

7.25. Снижение дымности и токсичности отработавших газов автомобилей применением присадок к топливу

7.25.1. Применение в автомобилях присадки

В последние годы в связи с усилившимся загрязнением атмосферы большой интерес проявляется к применению присадок, влияющих на процесс сгорания в дизелях.

При некачественном и неполном сгорании с ОГ дизелей наряду с такими токсичными компонентами, как CO , C_nH_m и NO_x выбрасываются значительные количества сажи. Она образуется в результате крекинга и неполного сгорания топлива, содержит адсорбированные углеводороды, продукты частичного окисления – альдегиды и вещества, образовавшиеся при распаде полимерных соединений (циклические ароматические углеводороды).

В результате исследований установлено, что можно в значительной мере уменьшить дымность ОГ посредством добавки к топливу соответствующих химических соединений. По характеру действия присадки к топливу можно разделить на две группы: присадки, интенсифицирующие горение, и антидымные присадки. В качестве таких присадок к дизельным топливам применяют **металлоорганические соединения**.

Механизм действия антидымных присадок заключается, вероятно, в их рассеивающем воздействии на сажу и каталитическом воздействии на процесс сгорания. Воздействие металлоорганических соединений на уменьшение дымности ОГ тем эффективнее, чем сильнее их рассеивающее воздействие и активнее свободный атом металла.

Среди таких присадок наиболее эффективными являются присадки, содержащие **соединения бария**. Даже незначительное содержание порядка 0,01% по массе этих присадок в дизельных топливах вызывает заметное уменьшение дымности ОГ. Наибольший эффект в уменьшении дымности ОГ достига-

ется при содержании в топливе присадок в пределах 0,020...0,025%.

Подобное, но менее эффективное воздействие на уменьшение дымности оказывают металлоорганические соединения, добавляемые в качестве антидетонационных присадок к бензинам. Они характеризуются высокой стабильностью соединения, их распад в пламени происходит только при высоких температурах.

В процессе сгорания освобождается активный атом металла. Предполагается, что молекулы сажи адсорбируют активные атомы металла и сгорание приобретает каталитический характер.

В качестве присадок к топливам дизелей используют также органические соединения, являющиеся **сильными окислителями**, которые содержат слабосвязанный кислород. При температуре сжатого заряда, которая создается в камере сгорания, активный кислород легко высвобождается, что вызывает сокращение периода задержки самовоспламенения, оказывая влияние на процесс сгорания.

К органическим соединениям, добавляемым в дизельное топливо, относятся:

- динитропропан;
- изоамилнитрат;
- этилнитрат;
- n – метиланилин;
- этилацетилоктан и др.

Установлено, что при одинаковом весовом содержании этих органических соединений в топливе, эффективность их действия почти в 4 раза ниже по сравнению с металлоорганическими присадками.

В случае применения присадок, интенсифицирующих горение, повышается цетановое число топлива, что влияет на процесс сгорания и выделение токсичных веществ. С повышением цетанового числа топлива заметно уменьшается количество светлого дыма, появляющегося при пуске холодного дизеля.

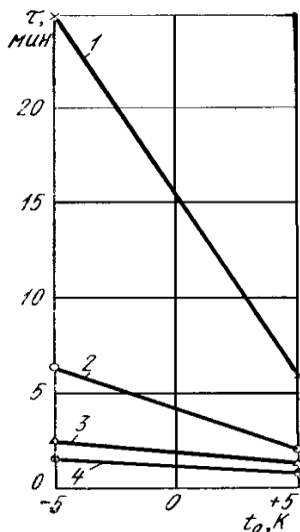


Рис. 7.50. Зависимость τ от добавления присадок
 1 - ДТ с ЦЧ=50;
 2 - ДТ+0,5%
 циклогексанолнитрата
 (ЦГН), ЦЧ=63;
 3 - ДТ+1% ЦГН, ЦЧ=72;
 4 - ДТ+2% ЦГН, ЦЧ=83

На рис. 7.50 показана зависимость времени после пуска холодного дизеля, в течение которого оптическая плотность светлого дыма уменьшается до 10 единиц, от добавления присадки, интенсифицирующей горение. В качестве присадки при испытаниях использовали циклогексанолнитрат. Дизель после холодного пуска работал на режиме холостого хода. Испытания проводили при различной температуре окружающей среды.

Эффективность действия различных интенсификаторов горения на цетановое число дизельного топлива приведена в табл. 7.1. Эти присадки целесообразно добавлять к топливу с низким цетановым числом. Исследования показали, что рассмотренные выше присадки не приводят к повышению износа поршневых колец и

не увеличивают отложений за первым кольцом.

Таблица 7.1

Эффективность воздействия присадок на ЦЧ

Присадка	Цетановое число топлива при добавлении присадки, %					
	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
Метилацетат	33	40	44	50	55	60
Ацетонпероксид	33	41	45	51	57	63
Этилнитрат	33	39	44	49	53	57
Изоамилнитрат	33	39	44	49	54	58
Бутилпероксид	33	43	48	55	57	60

Для уменьшения темного дыма (выделения сажи) применяют специальные антидымные присадки. В результате исследо-

ваний органических металлосодержащих присадок установлено, что они являются более эффективными. Среди них наибольшей эффективностью обладают присадки, содержащие барий, метилциклопентадиенилтрикарбонилмарганец (МЦТМ) и тетраэтилсвинец (ТЭС).

Ряд присадок, содержащих барий, был создан еще в СССР в Институте химии присадок АН Азербайджана. На отдельных режимах работы двигателя (при нагрузке 75—110% от номинальной N_e) отечественная присадка А-2 уменьшала содержание сажи на 90%.

Добавление к топливу металлосодержащих присадок практически не влияет на выделение дизелями окиси углерода, выделение альдегидов и бенз(а)пирена при этом несколько уменьшается. Для правильного выбора присадок необходимо знать механизм их действия на сажу. Интересные исследования проведены в МАДИ по изучению механизма действия присадок ЦТМ и А-2 на выделение сажи. Было установлено, что при добавлении к топливу присадки ЦТМ значительно ускоряется выгорание сажи в период от в.м.т. до примерно 100° после в.м.т., а присадка типа А-2 эффективна в период догорания, продолжающегося в процессе выпуска. Поэтому целесообразно создавать комплексные присадки. Влияние комплексных присадок на выделение сажи показано на рис. 7.51.

Они оказываются более эффективными, чем ЦТМ или А-2 в отдельности. Для широкого применения антидымных присадок на дизелях необходимо всестороннее определение их влияния на работу топливной аппаратуры, износ поршневых колец и т.д.

В качестве антидымной присадки может применяться аммиак совместно с фильтром сажевых частиц. Добавка аммиака к ДТ позволяет снизить температуру начала реакции дожигания сажевых частиц в фильтре.

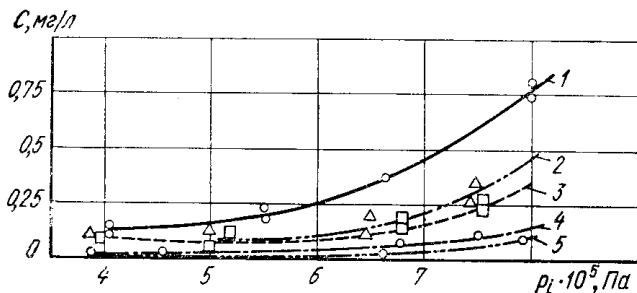


Рис. 7.51. Влияние присадок на выделение сажи:
 1 – без присадки; 2 – с присадкой 0,05% ЦТМ; 3 – с присадкой 1% А-2; 4 – с присадкой 1% А-2 и 0,05% ЦТМ; 5 – с присадкой 1% А-2 и 0,05% ЦТМ при угле опережения впрыска, увеличенном на 60

7.25.2 Применение в автомобилях присадок к бензинам

Для повышения детонационной стойкости бензинов широко применялась присадка на основе ТЭС. В последние годы во многих странах запрещено использования ТЭС в качестве антидетонационной присадки к бензинам.

Рассмотрим более подробно проблемы, возникающие при решении вопроса указанными путями. При применении бензинов без ТЭС возрастают требования к их октановому числу и увеличивается количество нежелательных токсичных веществ в отработавших газах. Требования к октановому числу бензина без ТЭС повышаются из-за ухудшения антидетонационных свойств двигателя. В случае отсутствия ТЭС происходит более интенсивное нагарообразование на поверхности камеры сгорания (днище поршня и т.д.), в результате чего теплопередача от газов в стенки ухудшается. Температура топливоздушной смеси в цилиндре в конце сжатия при сгорании повышается, что способствует протеканию предпламенных реакций, образованию перекисей и появлению детонации.

С увеличением пробега автомобиля требования к октановому числу бензина возрастают. Для товарных бензинов дополнительное повышение октанового числа достигает 6,3 единицы. При применении неэтилированных бензинов из-за уменьшения

октанового числа несколько снижается степень сжатия и, следовательно, мощность и КПД двигателя. В этом случае повышаются также износ и задиры седел выпускных клапанов на режимах больших нагрузок и при высокой частоте вращения коленчатого вала

В ряде стран в последние годы проводятся работы по созданию антидетонационных присадок, не содержащих свинца. Среди исследованных веществ на основе **марганца** (наиболее эффективными оказались циклопентадиенилтрикарбонилмарганец (ЦТМ) и метилциклопентадиенилтрикарбонилмарганец (МЦТМ)), а также **метил-трет-бутиловый эфир** (МТБЭ) и железосодержащие присадки на основе **ферроцена**.

Исследования показали, что в среднем эффективность ЦТМ и ТЭС при добавлении их в товарные автомобильные бензины приблизительно одинакова (при равной концентрации по массе антидетонаторов в целом).

В случае работы двигателя на бензине с ЦТМ во впускной системе и камерах сгорания образуется меньше отложений, чем при использовании бензина с ТЭС. Особенностью нагара, остающегося при работе на бензине с ЦТМ, является то, что он вызывает перебои в работе свечей зажигания и преждевременное воспламенение рабочей смеси от тлеющих частиц.

Установлено, что применение бензинов с ЦТМ не ухудшает технического состояния двигателя.

Единственный недостаток бензинов с ЦТМ — ускоренный выход из строя свечей зажигания. Работы по исследованию и внедрению ЦТМ в настоящее время продолжаются.

Сравнительно узкие пределы воспламеняемости бензовоздушных смесей приводят к тому, что при обеднении смеси до $\alpha=1,15—1,20$ и более двигатели с ИЗ работают неустойчиво. При сильном обеднении и обеспечении устойчивой работы двигателя можно существенно уменьшить выделение всех основных токсичных компонентов (CO , C_nH_m , NO_x).

Расширить предел обеднения бензовоздушной смеси можно присадкой водорода. При присадке 20% H_2 (по массе к массе водорода и изооктана) устойчивая работа двигателя обеспечивается при $\alpha= 2,5$.

7.26. Уменьшение токсичных выбросов с картерными газами и из топливной системы двигателя

7.26.1. Система вентиляции картера двигателя

Схема системы вентиляции картера двигателя представлена на рис. 7.52.

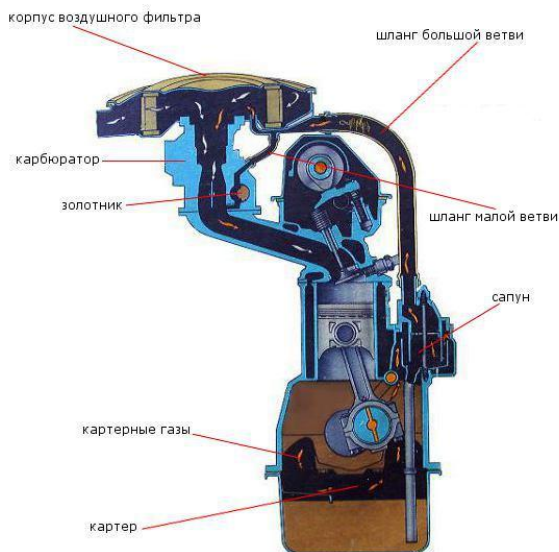


Рис. 7.52. Схема системы вентиляции картера двигателя

Система вентиляции картерных газов двигателей с карбюраторами 2105, 2107 «Озон» и их модификациями состоит из большой и малой ветвей. Через большую и малую ветвь газы удаляются при повышенных нагрузках, через корпус воздушного фильтра и карбюратор, при невысоких нагрузках удаление происходит через малую ветвь, в карбюратор, и далее в задрозельное пространство.

Под воздействием разрежения, возникающего в корпусе воздушного фильтра при открытых дроссельных заслонках и высоких оборотах коленчатого вала двигателя, картерные газы высасываются из картера двигателя и принудительно подаются

через сапун и шланг вентиляции в полость воздушного фильтра после фильтрующего элемента. Это работает большая ветвь системы вентиляции. Через малую ветвь, в этом случае, происходит дополнительное удаление. Золотник (рис. 7.53), входящий в малую ветвь вентиляции, находящийся на оси дроссельной заслонки первой камеры, внутри корпуса карбюратора, увеличивает проходное отверстие для прохождения картерных газов по мере открытия дроссельной заслонки и вращения ее оси.



Рис. 7.53. Схема работы золотника

При работе двигателя на холостом ходу или с небольшими нагрузками дроссельные заслонки либо закрыты, либо слегка приоткрыты, разрежение в корпусе воздушного фильтра слишком мало и вентиляция через большую ветвь происходит вяло, а под закрытыми дроссельными заслонками разрежение довольно велико. Поэтому вентиляция происходит через малую ветвь вентиляции картера. Золотник перекрывает отверстие отвода газов, и они проходят лишь через малое калиброванное отверстие, таким образом предотвращается неустойчивая работа двигателя на холостом ходу из-за чрезмерного «подсоса» постороннего воздуха в карбюратор.

7.26.2. Система улавливания паров бензина

Образование паров происходит при нагревании бензина в топливном баке и при понижении атмосферного давления. Пары бензина накапливаются в топливной системе и при запуске двигателя, происходит их вывод во впускной коллектор, что приводит к поступлению их в камеру сгорания и дальнейшему сгоранию. Данная система используется во всех современных бензиновых двигателях.

Схема системы улавливания паров бензина представлена на рис. 7.54.

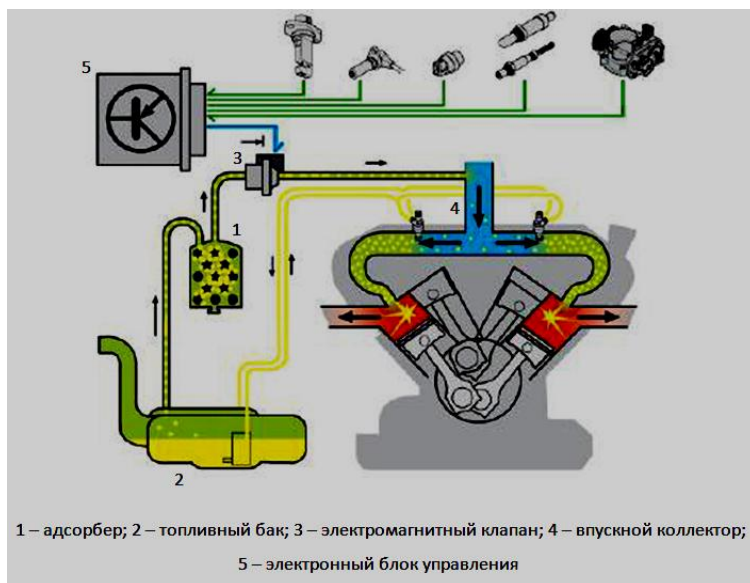


Рис. 7.54. Схема системы улавливания паров бензина

Конструкция системы улавливания паров имеет следующие элементы:

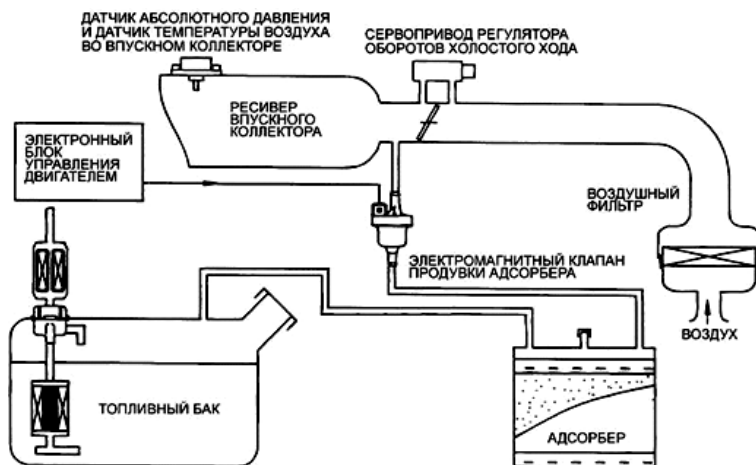
- соединительные трубопроводы, по которым перемещаются пары топлива;
- электромагнитный клапан, продувающий адсорбер;
- адсорбер.

В основе данной системы – адсорбер, который производит сбор паров бензина из топливного бака. Заполняют адсорбер гранулы активированного угля, поглощающие и сохраняющие пары бензина. Адсорбер соединяется с:

- атмосферой посредством отдельного клапана на входе или воздушного фильтра;
- впускным коллектором;
- топливным баком.

Освобождается адсорбер от паров бензина за счет электромагнитного клапана продувки адсорбера. Клапан относится к исполнительным механизмам системы управления двигателем и расположен в трубопроводе, который соединяет впускной коллектор и адсорбер.

ПРИНЦИП РАБОТЫ



1. В неподвижном автомобиле в топливном баке создается избыточное давление паров топлива, которые по трубопроводу поступают в адсорбер.

2. Электронный блок управления, в зависимости от режима работы двигателя, подает команду к открытию электромагнитному клапану.

3. Пары бензина, которые находились в адсорбере, продуваются, используя разрежение, появившееся во впускном коллекторе.

4. После адсорбера пары перемещаются во впускной коллектор, откуда попадают в камеру сгорания, где происходит их сжигание.

Количество паров, поступающих в камеру сгорания, регулируется и определяется временем, в течение которого открыт электромагнитный клапан.

Двигатели, оснащенные турбонаддувом, имеют компрессор, который не создает разрежение во впускном коллекторе. Поэтому в системах улавливания паров турбированных двигателей предусмотрен двухходовой клапан, срабатывающий и направляющий пары бензина при продувке адсорбера на впуск компрессора, если имеется давление наддува, либо во впускной коллектор, если отсутствует давление наддува.

7.27. Интенсификация зажигания

Одним из перспективных направлений улучшения экономических и экологических характеристик бензиновых ДВС является создание двигателя с рабочим процессом на бедных топливовоздушных смесях. Однако практическая реализация этой идеи требует решения ряда проблем, главная из которых – возрастающая по мере обеднения смеси межцикловая нестабильность процесса сгорания, обусловленная растущим количеством циклов с вялым протеканием процесса сгорания и пропусками воспламенения. Это приводит к резкому росту расхода топлива и увеличению содержания токсических компонентов в отработавших газах.

Величина межцикловой нестабильности непосредственно связана с длительностью начальной фазы сгорания. В этой связи обеспечение быстрого развития начального очага (НО) горения является главным путем повышения межцикловой стабильности и расширения пределов эффективного обеднения смеси.

Форсирования развития НО и расширения, тем самым, пределов эффективного обеднения смеси можно достичь, например, увеличением воспламеняющей способности искры.

Самым простым решением этого является увеличение объема начального очага за счет увеличения межэлектродного зазора $\Delta_{эл}$ свечей зажигания при сохранении традиционных схем систем зажигания. Зазор между электродами определяет длину канала искры и объем активированной разрядом области. При этом увеличивается площадь контакта искрового канала с зажигаемой смесью и уменьшается теплоотвод в электроды, очаг начинает развиваться от больших начальных размеров, что способствует ускоренному развитию пламени (рис. 7.55). Наибольший эффект достигается при увеличении зазора в ДВС от 0,6 до 0,9...1,2 мм.

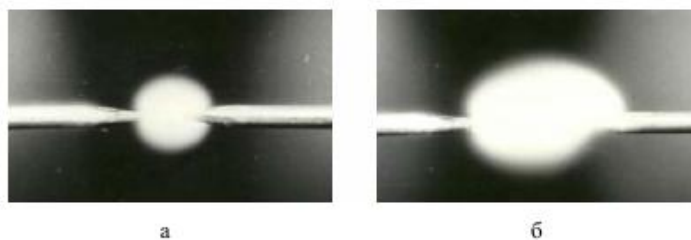


Рис. 7.55. Фотографии искрового разряда (стандартные атмосферные условия):
а – $\Delta_{эл} = 1 \text{ мм}$; *б* – $\Delta_{эл} = 3 \text{ мм}$

Дальнейшее его увеличение приводит к росту величины пробивных напряжений и увеличению потребляемой энергии.

Увеличения размеров НО можно достичь применением многоочагового воспламенения. Такое зажигание может быть реализовано при помощи специальных многоэлектродных свечей зажигания, имеющих два, три или четыре боковых электрода, равномерно распределенных по окружности.

Применение таких свечей заметно уменьшает невоспроизводимость изменения давления в последовательных рабочих циклах. Это объясняется большей вероятностью попадания в зону искры топливоздушную смесь оптимального состава и форсированием развития начальной фазы сгорания благодаря увеличению его начального размера.

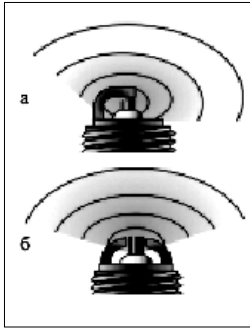


Рис. 7.56. Динамика развития фронта пламени

исходит без гасящего влияния боковых электродов (рис. 7.56,б).

Наиболее простым способом форсирования процесса воспламенения, не требующим конструктивного вмешательства в ДВС, является воздействие на формирование начального очага через увеличение параметров традиционного искрового разряда – силы тока и длительности разряда.

Увеличение силы тока I_p в ионизационном канале между электродами свечи зажигания приводит к повышению температуры смеси вокруг него, что интенсифицирует реакции горения.

Увеличение длительности разряда τ_p повышает его воспламеняющую способность. Кроме того, при длительном разряде создается большая вероятность благоприятного для зажигания локального сочетания параметров смеси в области межэлектродного зазора. Положительную роль играет также подпитка начального очага энергией, выделяющейся в индуктивной фазе.

Использование бесконтактно-транзисторных (TSZi (накопление энергии в индуктивности + индукционный датчик), TSZh (накопление энергии в индуктивности + датчик Холла), НКZk, НКZi, НКZh (накопление энергии в ёмкости + контактный датчик, индуктивный датчик и датчик Холла, соответственно) позволяет повысить энергию искрового разряда, увеличивает крутизну фронта нарастания высокого напряжения между электродами свечи. Это ведет к:

Еще один благоприятный фактор связан с условиями распространения фронта пламени. В случае применения одноэлектродных свечей зажигания рождающийся фронт пламени ограничен поверхностью бокового электрода (рис. 7.56,а). Его интенсивное развитие начинается лишь по выходу из межэлектродного пространства. У многоэлектродных свечей, напротив, зазор «открыт» и развитие фронта про-

- уменьшению влияния отложения нагара на изоляторах свечи;
- стабилизации воспламенения смеси на малых нагрузках и переходных режимах;
- расширению пределов возможного обеднения.

Еще более эффективным в этом смысле является применение МСУД (микропроцессорных систем управления двигателем – VSZ (полностью электронная и «статическая» – без подвижных частей – система зажигания)) см. рис. 7.57.

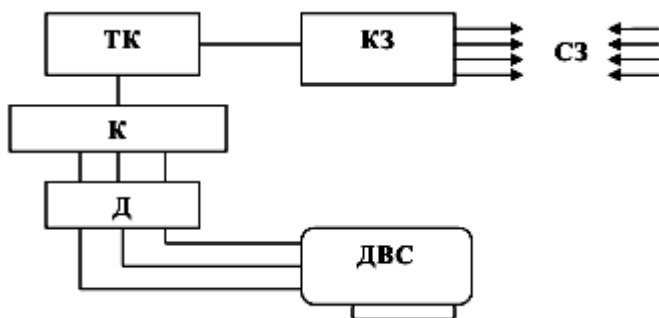


Рис. 7.57. Схема системы зажигания с электронным управлением: Д – датчики; К – контроллер; ТК – транзисторный коммутатор; КЗ – катушка зажигания; СЗ – свечи зажигания

7.28. Нейтрализация отработавших газов

7.28.1. Пламенные (термические) нейтрализаторы отработавших газов

Токсичные компоненты ОГ, такие как CO и C_nH_m , могут быть нейтрализованы в выпускной системе двигателя. С целью окисления CO и C_nH_m до конечных продуктов сгорания, в поток горячих ОГ, непосредственно за выпускным клапаном, подводится дополнительный воздух, как показано на рис. 7.58.

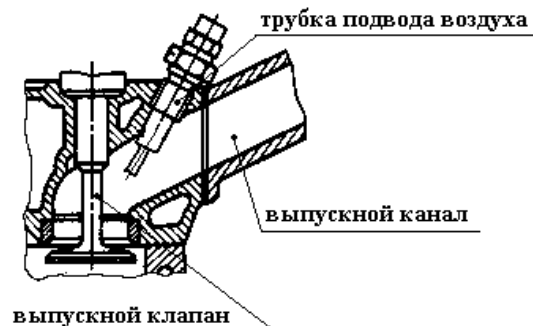


Рис. 7.58. Подвод дополнительного воздуха

В любой выпускной системе происходит в определенной степени процесс окисления. Этот процесс можно активировать посредством турбулентного смешивания воздуха с ОГ при высоких температурах.

Протекание реакции окисления углеводородов в выпускной системе двигателя зависит от:

- концентрации C_nH_m и O_2 в ОГ;
- температуры, давления и времени нахождения ОГ в зоне реакции.

При работе двигателя на богатых смесях $\alpha < 1,0$ реакция окисления происходит не может из-за отсутствия свободного кислорода. Для осуществления реакции окисления необходима подача дополнительного воздуха в выпускной трубопровод двигателя.

Схема системы подачи дополнительного воздуха в выпускной трубопровод представлена на рис. 7.59.

Воздух под давлением $0,5 \div 0,7$ атм. подается **ротационным насосом**, приводимым от к.в. Подача воздуха в выпускную систему регулируется в зависимости от состава смеси. По мере обеднения смеси подача воздуха уменьшается. Для защиты насоса от взрыва несгоревшей смеси, скопившейся в выпускном трубопроводе, служит **обратный клапан**. **Разгрузочный клапан** служит для отвода части воздуха и выравнивания давления в период работы двигателя на больших частотах.

Воздушный клапан действует при переходе от больших и средних частот вращения двигателя на режим малых нагрузок.

При этом резко возрастает разрежение во впускном трубопроводе, в результате чего происходит моментальное испарение топливной пленки, что способствует значительному обогащению смеси.

Для интенсификации процесса пламенного дожигания продуктов неполного сгорания применяют специальные выпускные системы для поддержания высокой температуры ОГ. Наряду с этим увеличивают время прохождения ОГ через зону реакции и повышают качество перемешивания ОГ с воздухом.

Эффективный процесс дожигания C_nH_m начинается при температуре около $400^{\circ}C$, а CO – от $900^{\circ}C$.

Для усиления эффективности окислительной реакции при содержании в ОГ 2...3% кислорода необходимо, чтобы температура в выпускной системе составляла около $620^{\circ}C$.

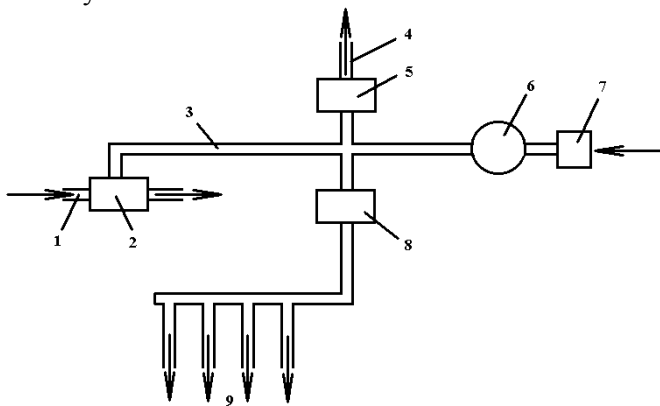


Рис. 7.59. Схема системы подачи дополнительного воздуха:

1 – соединение со впускным трубопроводом; 2 – воздушный клапан; 3 – соединение со впускным трубопроводом или атмосферой; 4 – выход в атмосферу; 5 – разгрузочный клапан; 6 – воздушный насос; 7 – воздухоочиститель; 8 – обратный клапан; 9 – трубопроводы подачи воздуха под выпускные клапаны

В обычных условиях движения автомобиля в городе температура ОГ двигателя является слишком низкой для активного дожигания углеводородов.

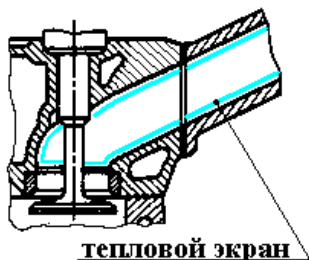


Рис. 7.60. Установка теплового экрана

Повысить температуру ОГ можно за счет снижения потерь тепла в камере сгорания и выпускной системе двигателя путем установки тепловых экранов (рис. 7.60), а также посредством уменьшения угла опережения зажигания. При установке экрана температура ОГ повышается в среднем на 110°C .

Эффект уменьшения концентрации C_nH_m в зависимости от способов тепловой изоляции выпускной системы представлен на рис. 7.61.

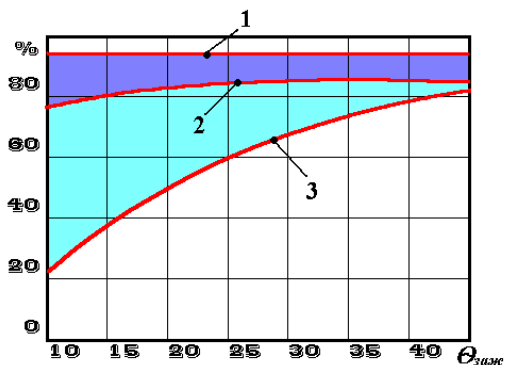


Рис. 7.61. Эффективность теплового экрана

- 1 – стандартная выпускная система;
- 2 – выпускная система с тепловым экраном;
- 3 – теплоизолированная выпускная система в 2,5 раза большего объема

Термический нейтрализатор представляет собой камеру сгорания, которая размещается в выпускном тракте двигателя для дожигания продуктов неполного сгорания топлива (C_nH_m и CO).

Он может устанавливаться на месте выпускного коллектора и выполнять его функции. Схема термического нейтрализатора представлена на рис. 7.62.

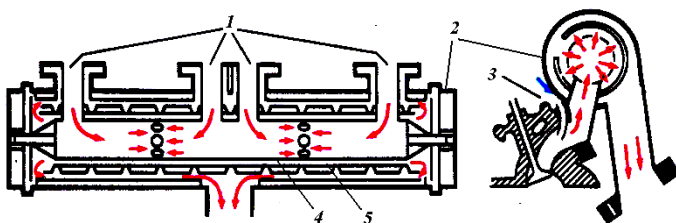


Рис. 7.62. Схема термического нейтрализатора:

1 – выпускной канал; 2 – теплоизоляция; 3 – трубка подвода воздуха за выпускной клапан; 4 – внутренняя камера; 5 – жаропрочный экран

Термический нейтрализатор состоит из корпуса с подводящими (выпускными) патрубками и одной или двух жаровых труб-вставок из жаропрочной листовой стали.

Хорошее перемешивание дополнительного воздуха, необходимого для окисления C_nH_m и CO , с выпускными газами достигается интенсивным вихреобразованием и турбулизацией газов при перетекании через отверстия в трубах и в результате изменения направления их движения системой перегородок. Для эффективного дожигания C_nH_m и CO требуется достаточно большое время, поэтому скорость газов в нейтрализаторе задается невысокой, вследствие чего объем его получается относительно большим. Чтобы предотвратить падение температуры ОГ, корпус теплоизолируется, а нейтрализатор располагают по возможности ближе к двигателю. Несмотря на это, время прогрева нейтрализатора до рабочей температуры после пуска двигателя составляет 10...15 мин.

Для сокращения времени прогрева повышают температуру ОГ, что достигается обогащением горючей смеси и уменьшением угла опережения зажигания, хотя и то и другое приводит к росту расхода топлива.

К таким же мерам прибегают для поддержания стабильного пламени и на переходных режимах работы двигателя.

Уменьшению времени прогрева способствуют также так называемые стабилизаторы пламени, монтируемые в выпускные каналы. Они представляют собой пластины из жаропрочной стали с рядом отверстий, причем суммарное сечение отверстий

несколько ниже сечения канала. Стабилизаторы обеспечивают окисление продуктов неполного сгорания ОГ при пуске и прогреве двигателя, а также эффективное действие реактора в широком диапазоне работы двигателя.

Эффективность процесса дожигания C_nH_m и CO в термическом реакторе в зависимости от процентного содержания дополнительного воздуха в отработавших газах представлена на рис. 7.63.

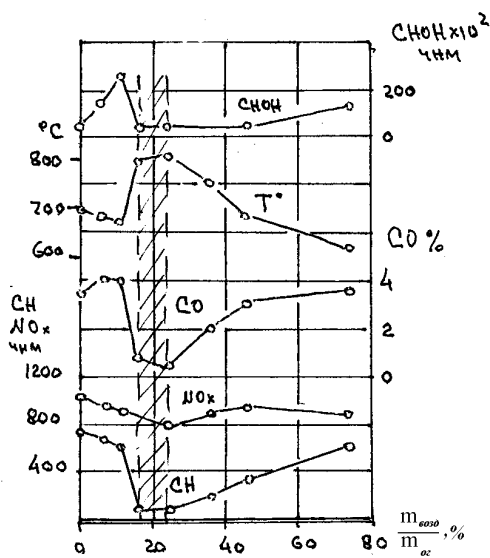


Рис. 7.63. Эффективность дожигания в зависимости от процентного содержания дополнительного воздуха

Максимальный эффект дожигания продуктов неполного сгорания C_nH_m и CO достигается при подаче в отработавшие газы порядка 20% дополнительного воздуха по массе.

В заключение следует отметить, что вследствие возрастания противодавления в выпускной системе со встроенным реактором происходит некоторое увеличение удельного эффективного расхода топлива.

7.28.2. Применение на автомобилях каталитических нейтрализаторов отработавших газов

Каталитические нейтрализаторы служат для дожигания (окисления) продуктов неполного сгорания (C_nH_m и CO) и разложения окислов азота NO_x .

Каталитическое действие нейтрализаторов основано на беспламенном поверхностном окислении токсичных веществ в присутствии катализатора, ускоряющего химическую реакцию.

Процесс окисления происходит во время прохождения ОГ через слой носителя с нанесенным на него катализатором, причем скорость реакции окисления (сгорания) зависит также от температуры носителя.

Наиболее универсальным катализатором для очистки ОГ является *платина* (Pt). Однако, платина – это дефицитный и дорогостоящий металл, поэтому проводятся интенсивные исследования по определению возможности использования в качестве катализаторов других металлов и соединений. Трудности при выборе катализаторов связаны с условиями эксплуатации автомобилей. Катализаторы должны характеризоваться высокой эффективностью действия, большой механической прочностью и устойчивостью к вибрациям, стабильностью и эксплуатационной стойкостью в условиях резкого изменения температуры катализатора в пределах 150...800⁰С. Кроме этого, трудности, связанные с применением катализаторов, обусловлены высокими и изменяющимися концентрациями токсичных веществ в ОГ и воздействием некоторых из них на сам катализатор, например, сажи, серы и свинца (в ОГ бензиновых ДВС).

На основании приведенных исследований установлено, что частично вышеуказанным требованиям отвечают *металлы*:

- палладий (Pd);
- родий (Rh);
- рутений (Ru)

окислы металлов:

- окись меди (CuO);
- окись хрома (Cr₂O₃);
- окись никеля (NiO);
- окись кобальта (Co₃O₄);
- двуокись марганца (MnO₂).

Перечисленные металлы и окислы только в некоторой степени уступают платине, при этом они значительно дешевле.

Эффективность действия каталитического нейтрализатора ОГ зависит от:

- температуры катализатора;

- продолжительности контакта токсичных компонентов ОГ с поверхностью катализатора (от отношения объемного расхода газа к объему катализатора);
- концентрации токсичных веществ в ОГ.

Эффективность действия различных катализаторов представлена в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Эффективность действия катализаторов

Вид катализатора	Хим. формула	Окисление % Температура окисления °С		
		CO	C_nH_m	NO_x
Платина на керамике	Pt	$\frac{100}{300...500}$	—	—
Платина на окиси алюминия	Pt / Al ₂ O ₃	$\frac{50...100}{500...750}$	$\frac{50...90}{500...750}$	—
Платина на носителе	Pt	—	$\frac{100}{400...500}$	$\frac{96...98}{150...250}$
Палладий на окиси алюминия	Pd / Al ₂ O ₃	$\frac{100}{200...500}$	—	—
Палладий на носителе	Pd	—	$\frac{100}{400...500}$	—
Окись меди на окиси алюминия (1:1)	CuO Al ₂ O ₃	$\frac{98...100}{200...300}$	$\frac{80}{200...400}$	$\frac{25}{350}$
Окись меди – окись марганца	CuO MnO ₂	$\frac{98...99}{200...400}$	—	—
Окись меди с окисью хрома (17% Cr ₂ O ₃ , 87% CuO)	CuO Cr ₂ O ₃	—	—	$\frac{56...90}{130...200}$

Эффективность действия катализатора (Pt) в зависимости от температуры представлена на рис. 7.64.

Из графика следует, концентрация CO и альдегидов в ОГ может быть снижена практически до 0 при температуре катализатора свыше 600°С. Такая температура достигается при работе двигателя с полной нагрузкой, а при работе двигателя на режимах х.х. и малых нагрузок эффективность катализатора значительно снижается.

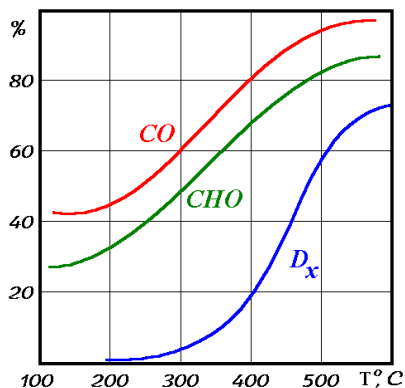


Рис. 7.64. Эффективность действия катализатора от Т

По температурному диапазону активности катализаторы можно разделить на:

- низкотемпературные (высокая активность при $T=100\dots300^{\circ}\text{C}$),

- высокотемпературные (высокая активность при $T>300^{\circ}\text{C}$).

К первой группе относятся катализаторы из окислов, например смесь 60% MnO_2 и CuO .

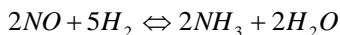
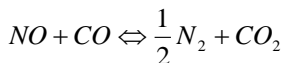
Ко второй группе – платина (Pt) и палладий (Pd) и их окислы.

Принято считать, что эффективность каталитического воздействия нейтрализатора зависит главным образом от температуры катализатора.

Кроме этого эффективность действия катализатора зависит от времени его эксплуатации. Особенно сильно снижается со временем воздействие на углеводороды C_nH_m . Так, при пробеге автомобилем ~100 тыс. км эффективность катализатора может снизиться до 50%. При этом воздействие на CO практически не изменяется. Эффективность действия катализаторов на благородных металлах быстро снижается при работе на этилированном бензине. Это связано с тем, что свинец, содержащийся в бензине, отравляет катализатор. Уже после пробега 6...8 тыс. км эффективность платинового нейтрализатора снижается до 35% по отношению к C_nH_m и до 45% по отношению к CO .

На рис. 7.65 представлена схема двухкамерного каталитического нейтрализатора, служащего для восстановления NO_x в одной камере и окисления CO и C_nH_m во второй.

В камере 5 под действием катализатора происходит восстановление окиси азота по реакции:



В этих реакциях указан NO , а не NO_x , т.к. в ОГ двигателей с искровым зажиганием NO_x состоит на 99% из NO .

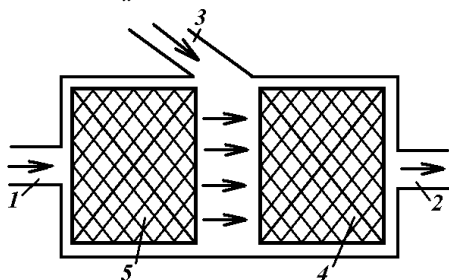
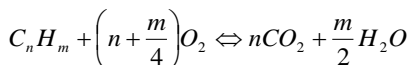
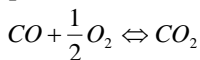


Рис. 7.65. Схема двухкамерного каталитического нейтрализатора

1 – подвод ОГ, 2 – подвод дополнительного воздуха, 3 – отвод ОГ, 4 – камера с катализатором для окисления CO и C_nH_m , 5 – камера с катализатором для восстановления NO_x

В камере 4, в присутствии дополнительно вводимого воздуха, процесс окисления идет по реакции:



Для обеспечения восстановительной среды ОГ в камере 5 двигатель должен быть отрегулирован для работы на смеси, близкой к стехиометрической, но с небольшим избытком топлива ($\alpha < 1,0$).

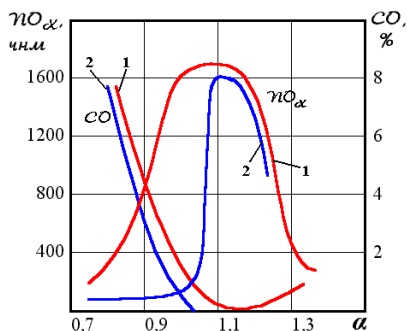


Рис. 7.66. Зависимость концентрации CO и NO_x в ОГ от состава смеси:
 1 – стандартная система выпуска;
 2 – выпускная система с окисляющим нейтрализатором

На рис. 7.66 представлена зависимость концентрации CO и NO_x в ОГ от состава смеси. Из графика видно, что при $\alpha=1,05$ активность катализатора по отношению к NO_x резко уменьшается, так как среда становится окислительной.

Каталитические нейтрализаторы используются для очистки ОГ двигателей с искровым зажиганием и дизелей.

Эффективность окисления токсичных компонентов в зависимости от количества воздуха, вводимого в 2-х камерный каталитический нейтрализатор представлена на рис. 7.67.

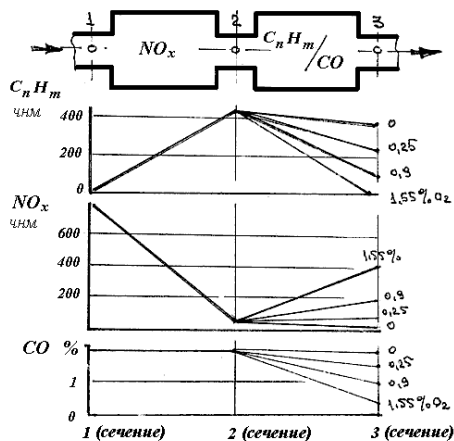


Рис. 7.67. Эффективность окисления

Т.к. дизели на всех режимах работают с большим коэффициентом избытка воздуха, то содержание кислорода в ОГ превышает 10%, а концентрация CO и H_2 обычно составляет не более 0,1...0,2%, поэтому среда ОГ остается окислительной и восстановительная реакция NO_x практически не может осуществляться. Кроме этого, в ОГ дизелей содержится большое количество сажи, которая забивает катализатор и снижает его активность.

Каталитические нейтрализаторы без дополнительных устройств обеспечивают дожигание в ОГ только CO , C_nH_m и альдегидов.

Для увеличения поверхности контакта с ОГ катализатор наносится тонким слоем на поверхность носителя из кремнезема или глинозема в виде шариков или на поверхность монолитного носителя с ячейками.

Конструкция комбинированного каталитического нейтрализатора представлена на рис. 7.68.

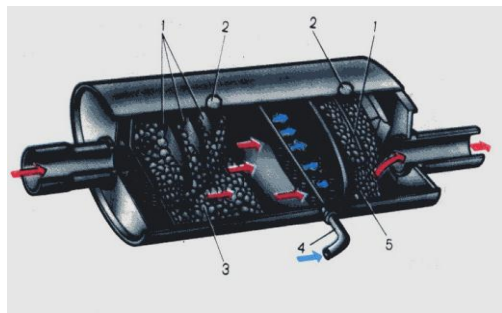


Рис. 7.68. Комбинированный каталитический нейтрализатор с шариковым носителем:

1 - направляющие лопатки; 2 - пробка для заполнения катализатора; 3 - камера восстановления NO_x ; 4 - подвод дополнительного воздуха; 5 - камера окисления CO и C_nH_m ; 6 - шариковый носитель

Носитель с катализатором помещают в корпус, который может быть объединен с глушителем шума выпуска. Выпускные трубопроводы и корпус каталитического нейтрализатора теплоизолируют, чтобы уменьшить теплоотдачу от выпускных газов.

Конструкция комбинированного каталитического нейтрализатора с монолитным ячеистым носителем представлена на рис. 7.69.

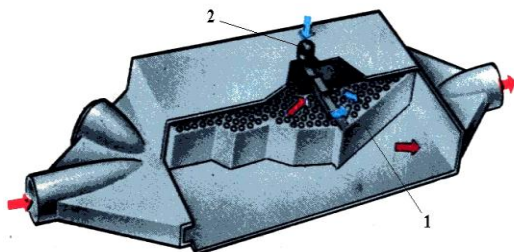


Рис. 7.69. Каталитический нейтрализатор с монолитным ячеистым носителем:

1 - монолитный носитель; 2 - подвод дополнительного воздуха

И, наконец, следует отметить, что все каталитические нейтрализаторы, монтируемые в выпускную систему, независимо от конструкции, увеличивают противодавление на выпуске, что приводит к увеличению работы насосных ходов и снижению эффективной мощности двигателя на 8...15%.

Основным недостатком каталитических нейтрализаторов является неэффективная их работа в диапазоне низких температур ОГ.

В связи с этим были разработаны устройства, состоящие из пламенного и каталитического нейтрализаторов.

Возможны **комбинации пламенного и каталитического нейтрализаторов** в двух вариантах:

- каталитический нейтрализатор для нейтрализации NO_x + термический нейтрализатор для дожигания CO и C_nH_m ;
- первым устанавливается термический, а вторым – окислительный каталитический для дожигания CO и C_nH_m . Дополнительный воздух для окисления CO и C_nH_m подводится во второй нейтрализатор. C_nH_m

Контрольные вопросы к главе 7

1. Назовите основные направления уменьшения выбросов ВВ двигателями с ИЗ:
 - продукты неполного сгорания
 - окислы азота
2. Назовите основные направления уменьшения выбросов ВВ дизелями:
 - продукты неполного сгорания
 - окислы азота
3. Как воздействует изменение состава смеси на выбросы ВВ с ОГ?
4. На какие компоненты из состава ОГ можно воздействовать изменением угла опережения зажигания или угла опережения впрыскивания топлива?
5. Как влияет угол перекрытия клапанов на токсичность ОГ?
6. Каков механизм воздействия степени сжатия на токсичность ОГ?
7. С какими целями вводится предварительное смесеобразование и подогрев впускного коллектора?
8. За счет чего улучшаются экологические характеристики двигателя с ИЗ при введении распределенного впрыска топлива?
9. С какими целями организуется послойное смесеобразование?
10. Объясните работу двигателя Кушуля
11. Объясните работу вихрекамерного дизеля
12. Непосредственный впрыск бензина:
 - Объясните работу двигателя при послойном распределении смеси
 - Объясните работу двигателя при гомогенном распределении смеси
 - Объясните работу двигателя при гомогенно-обедненным распределении смеси
13. Нарисуйте схему и объясните рабочий процесс двигателя с форкамерно-факельным зажиганием.

14. Каким образом можно расширить многотопливность дизелей? Зачем используется принудительное зажигание в дизелях?
15. Какие цели достигаются введением многофазной подачи топлива?
16. Как работает система VTC фирмы HONDA?
17. Как работает система рециркуляции отработавших газов?
18. Как работает Система SCR?
19. Как достигается уменьшение токсичных выбросов с картерными газами и из топливной системы двигателя?
20. Каким образом можно интенсифицировать зажигание?
21. Назначение и принцип работы пламенного (термического) нейтрализатора ОГ
22. Назначение и принцип работы каталитического нейтрализатора ОГ

ЛИТЕРАТУРА

1. Брозе, Д.В. Сгорание в поршневых двигателях. - М.: «Машиностроение», 1969.
2. Воинов А.И. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: «Машиностроение», 1977. - 277 с.
3. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания : учебное пособие / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. - М.: Изд-во РУДН, 1998. – 214 с., ил.
4. Двигатели внутреннего сгорания/ А.С. Хачиян, К.А. Морозов, В.Н. Луканин и др. – М.: Высш. шк., 1985. – 311 с.
5. Денисов, А.С. Практикум по технической эксплуатации автомобилей / А.С.Денисов, А.С. Гребенников. - М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 272 с.
6. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с., ил.
7. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей : учебное пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2000. - 256 с.
8. Павлова Е.И. Экология транспорта : учебник / Е.И. Павлова. – М.: Транспорт. – 2000. – 248 с.
9. Сулейманов И.Ф. Организация движения автомобилей на основе экологического мониторинга воздушного бассейна : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / И.Ф. Сулейманов. – Оренбург, 2016. – 148 с.
10. Экологическая безопасность автомобиля и двигателя : учебное пособие / К.Г. Белоконь, В.Н. Никишин. – Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2016. – 242 с.
11. ГОСТ Р 41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН №83) «Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей»
12. ГОСТ Р 41.49-2003 «Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном

нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ».

13. ГОСТ Р 41.96-2011 – «Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями».

14. ГОСТ Р 41.24-2003 – «Единообразные предписания, касающиеся: I. Сертификации двигателей с воспламенением от сжатия в отношении дымности; II. Сертификации автотранспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, сертифицированных по типу конструкции; III. Сертификации автотранспортных средств с двигателями с воспламенением от сжатия в отношении дымности; IV. Измерения мощности двигателей».

15. ГОСТ Р 41.103-99 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения сменных каталитических нейтрализаторов для механических транспортных средств».

16. Специальный технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации вредных (загрязняющих) веществ».