



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

**Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»**

**В. В. Альферович**

# **ТОКСИЧНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**Учебно-методическое пособие**

**Часть 1**

**Минск  
БНТУ  
2016**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

В. В. Альферович

**ТОКСИЧНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-37 01 01  
«Двигатели внутреннего сгорания»  
дневной и заочной форм обучения

В 2 частях

Часть 1

**АНАЛИЗ СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

Минск  
БНТУ  
2016

УДК 621.43.068.4(075.8)

ББК 20.1я 73-5

A59

**Рецензенты:**

Э.К. Бересневич, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация воздушных судов и двигателей» Минского государственного высшего авиационного колледжа;

В.И. Савицкий, заместитель главного конструктора  
УГК ОАО УКХ «Минский моторный завод»

**Альферович, В. В.**

A59 Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» дневной и заочной форм обучения : в 2 ч. Ч. 1: Анализ состава отработавших газов / В. В. Альферович. – Минск : БНТУ, 2016. – 54 с.

ISBN 978-985-550-519-9 (Ч.1).

Приведена информация об особенностях образования вредных веществ при горении топлив в поршневых ДВС с внешним и внутренним смесеобразованием.

УДК 621.43.068.4 (075.8)

ББК 20.1я 73-5

ISBN 978-985-550-519-9 (Ч.1)

ISBN 978-985-550-520-5

© Альферович В. В., 2016

© Белорусский национальный  
технический университет, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время загрязнение атмосферы стало неизбежной составной частью современной жизни. Основным источником загрязнения можно считать процессы горения, в результате которых водород и углерод топлива соединяются с кислородом, находящимся в атмосфере. Примеси и присадки, содержащиеся в топливе, слишком высокая или низкая температура горения, неполное сгорание топлива приводят к образованию токсичных компонентов. Транспортные тепловые двигатели дают значительное количество выбросов, создающих химическое и тепловое загрязнение окружающей среды, они являются также источником шума и вибрации. Известно, что около 60 % загрязнений воздушного бассейна большинства стран вызвано работой транспорта. Транспорт имеет непосредственное отношение ко всем аспектам проблемы защиты природы, поскольку эта отрасль напрямую воздействует на окружающую среду через многомиллионный парк автомобилей, локомотивов, судов, самолетов, стационарных энергетических установок, транспортных предприятий. При полном сгорании 1 кг дизельного топлива, состоящего на 87,0 % из углерода, на 12,6 % – из водорода и 0,4 % – из кислорода, образуется 3,2 кг  $\text{CO}_2$  и 1,1 кг  $\text{H}_2\text{O}$ . При этом потребляется 3,32 кг атмосферного кислорода, что соответствует 14,3 кг воздуха (при содержании кислорода в воздухе 23,2 % по массе).

Загрязнение окружающей среды автотранспортом не только влияет на здоровье людей, но и наносит прямой экономический ущерб. Токсичные вещества, содержащиеся в воздухе, негативно воздействуют на почву, животный и растительный мир (кислотные дожди вызывают гибель лесов, садов, повышают кислотность почв). Наносится ущерб зданиям, сооружениям и различным конструкционным и строительным материалам. При этом значительно ускоряются процессы коррозии металлов. Так, например, в промышленных районах скорость коррозии стали возрастает в 20, а алюминия – в 100 раз по сравнению с сельской местностью.

Автомобильный транспорт необходимо рассматривать как индустрию, связанную с производством, обслуживанием и ремонтом автомобилей, их эксплуатацией, производством горючесмазочных материалов, с развитием и эксплуатацией дорожно-транспортной

сети. С этой позиции негативные воздействия автомобилей на окружающую среду можно объединить в следующие группы.

Первая группа связана с производством автомобилей:

высокая ресурсно-сырьевая и энергетическая емкость автомобильной промышленности;

собственное негативное воздействие на окружающую среду автомобильной промышленности (литейное производство, инструментально-механическое производство, стендовые и дорожные испытания, лакокрасочное производство, производство шин и др.).

Вторая группа обусловлена эксплуатацией автомобилей:

потребление топлива и воздуха, выделение вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ);

продукты истирания шин и тормозов;

шумовое загрязнение окружающей среды;

материальные и человеческие потери в результате транспортных аварий.

Третья группа связана с отчуждением земель под транспортные магистрали, гаражи и стоянки:

развитие инфраструктуры сервисного обслуживания автомобилей (автозаправочные станции, станции технического обслуживания, мойки автомобилей и др.);

поддержание транспортных магистралей в рабочем состоянии (использование соли для таяния снега в зимние периоды и др.).

Четвертая группа объединяет проблемы регенерации и утилизации аккумуляторов, шин, масел и других технологических жидкостей, самих отслуживших автомобилей.

Необходимо отметить, что из всех отрицательных воздействий, оказываемых двигателями внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду, наибольший ущерб наносится вредными выбросами в атмосферу. Поэтому в дальнейшем ограничимся только рассмотрением вопросов, связанных с загрязнениями атмосферы вредными компонентами отработавших газов ДВС.

## **1. СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

Автотракторные ДВС загрязняют атмосферу вредными веществами, выбрасываемыми с отработавшими газами, топливными испарениями и картерными газами. При этом 95 % токсичных компонентов, выделяемых дизелями, приходится на ОГ, представляющие собой мно-

гокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц и включающие в целом до 1000 компонентов.

*Дисперсность – это количество частиц в единице объема, а также распределение частиц по размеру. Чем мельче частицы, тем выше дисперсность.*

При идеальном протекании процесса сгорания стехиометрической смеси углеводородного топлива с воздухом в ОГ должны присутствовать лишь азот ( $N_2$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ) и пары воды ( $H_2O$ ). В реальных условиях ОГ также содержат оксид углерода, углеводороды, альдегиды, твердые частицы, перекисные соединения, избыточный кислород, оксиды азота и др. (табл. 1.1). Следует обратить внимание, что при сгорании стехиометрической смеси суммарная масса вредных примесей составляет менее 0,3 % от общей массы выхлопа (для дизеля даже меньше 0,1 %), но именно она и определяет экологический уровень двигателя.

*Экологический уровень двигателей – это степень вредного воздействия ДВС на окружающую среду: атмосферу, почву, воду, растительный и животный мир (в том числе и на человека), геологические образования, архитектурные строения.*

Количество выделяемых двигателем основных токсичных выбросов в значительной степени зависит от качества процесса сгорания. Протекание и эффективность процесса сгорания обусловлены главным образом следующими параметрами:

- типом двигателя, конструкцией камеры сгорания, степенью сжатия, организацией рабочего процесса, равномерностью распределения смеси по цилиндрам;
- регулировками устройств, отвечающих за состав топливно-воздушной смеси, углом опережения зажигания (впрыска топлива), тепловым состоянием;
- техническим состоянием (качеством изготовления и эксплуатации, сроком службы);
- типом и качеством используемого топлива;
- параметрами окружающей среды (температурой, влажностью, давлением, химическим составом воздуха);
- режимом работы двигателя (нагрузкой, частотой вращения, параметрами неустановившихся режимов).

Таблица 1.1

## Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

Компонент ОГ	Концентрация ОГ		Токсичные компоненты ОГ дизелей на режиме полной нагрузки	
	Бензиновый двигатель	Дизель	Концентрация, г/м <sup>3</sup>	Удельный выброс, г/((кВт/ч)
Азот N <sub>2</sub>	74–77 %	74–78 %	–	–
Кислород O <sub>2</sub>	0,3–8 %	2,0–18 %	–	–
Водяной пар H <sub>2</sub> O	3,0–5,5 %	0,5–9,0 %	15–100	–
Диоксид угле- рода CO <sub>2</sub>	5,0–12,0 %	1,0–12,0 %	40–240	–
Оксиды азота NO <sub>x</sub> , в том числе:	0,01–0,8 %	0,004–0,5 %	1,0–8,0	10–30
монооксид азота NO	–	0,004–0,5 %	1,0–4,5	6–18
диоксид азота NO <sub>2</sub>	–	0,00013–0,013 %	0,1–0,8	0,5–2,0
Монооксид углерода CO	0,5–12 %	0,005–0,4 %	0,25–2,5	1,5–12,0
Углеводороды СН <sub>x</sub>	0,2–3,0 %	0,009–0,3 %	0,25–2,0	1,5–8,0
Бенз(а)пирен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0–20 мкг/м <sup>2</sup>	0,05–1,0 мкг/м <sup>2</sup>	От 0,2 10 <sup>-6</sup> До 0,5 10 <sup>-6</sup>	От 1 10 <sup>-6</sup> До 2 10 <sup>-6</sup>
Сажа С	0–0,04 г/м <sup>3</sup>	0,01–1,1 г/м <sup>3</sup>	0,05–0,5	0,25–2,0
Оксиды серы SO <sub>x</sub> , в том числе:	До 0,008 %	0,002–0,02 %	–	–
диоксид серы SO <sub>2</sub>	–	0,0018–0,02 %	1,0–0,5	0,4–2,5
триоксид серы SO <sub>3</sub>	–	0,00004–0,0006 %	–	–
Альдегиды RCHO, в том числе:	0–0,2 %	0,0001–0,002 %	1,0–10,0	–
формальдегид НСНО	–	0,0001–0,0019 %	–	–
акролеин СН <sub>2</sub> СНСНО	–	0,0001–0,00013	0,001–0,04	0,06–0,2

«—» — показатель не определялся.

В камере сгорания поршневых ДВС горит не только само топливо, но и часть попадающего туда со стенок цилиндра смазочного масла (расход масла на угар). В современных двигателях эта величина находится в пределах 0,15–0,30 % от расхода топлива. Неполное сгорание масла и наличие в нем оксидов металлов, входящих в различные присадки, дополнительно увеличивают токсичность ОГ двигателя.

Степень воздействия на атмосферу не исчерпывается лишь продуктами сгорания минеральных топлив. Сам процесс их производства при переработке нефти и газа также сопровождается значительными вредными выбросами. Для объективной оценки воздействия АТС на воздушный бассейн необходимо учитывать весь жизненный цикл минеральных моторных топлив, а не ограничиваться лишь стадией эксплуатации.

Под *жизненным циклом объекта транспорта* понимается хронологически выраженная последовательность этапов создания (добычи и переработки сырья, производство конструкционных, эксплуатационных, дорожно-строительных материалов, транспортировки, хранения), производства (изготовление объекта), использования, восстановления работоспособности и утилизации (рис. 1.1).

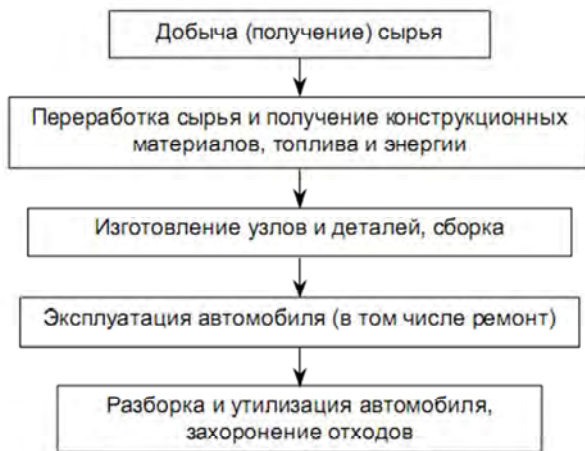


Рис. 1.1. Стадии жизненного цикла автомобиля



Таким образом, при оценке негативного воздействия АТС на состояние воздушного бассейна в целом необходимо, как минимум, суммировать выбросы ВВ как на стадии получения моторных топлив, так и на стадии эксплуатации самого АТС. Причем обе эти стадии сопоставимы по масштабам выбросов.

Для каждого компонента ОГ существуют предельно допустимые концентрации (ПДК), определяемые из принципа полного отсутствия их воздействия на человека. Предельно допустимые концентрации в воздухе населенных мест – это концентрации, которые при постоянном воздействии на человека в течение всей его жизни не могут оказать вредного влияния на здоровье. При этом допускается максимальное разовое (мр) и среднесуточное (сс) содержание ВВ в воздухе. Предельно допустимые концентрации основных токсичных компонентов ОГ и их классы опасности представлены в табл. 1.2.

Вредные вещества, находящиеся в воздухе, могут быть однонаправленного и разнонаправленного действия. При одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ разнонаправленного действия ПДК каждого из них остаются такими же, как и при изолированном действии. При одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ однонаправленного действия сумма отношений фактических концентраций каждого из них ( $K_1, K_2, \dots, K_n$ ) в воздухе к их ПДК ( $ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$ ) не должна превышать единицы:

$$(K_1/ПДК_1) + (K_2/ПДК_2) + \dots + (K_n/ПДК_n) \leq 1.$$

Воздействие вредных веществ на человека определяется уровнем концентрации вещества в атмосфере, степенью токсичности вещества, а также продолжительностью воздействия. Отравление человека ОГ приводит к респираторным заболеваниям, бронхиту и легочной недостаточности. Отработавшие газы дизеля содержат чрезвычайно токсичные вещества, разрушающие легкие и нарушающие координацию, среди которых наиболее токсичными компонентами следует считать оксид углерода (5–1500 частиц/млн), углеводороды (20–400 частиц/млн), оксиды азота (50–2500 частиц/млн), диоксид серы (10–150 частиц/млн) и твердые частицы (0,25–0,1 г/м<sup>3</sup>).

По способу образования вредные вещества, содержащиеся в ОГ, можно разделить на три группы:

1) продукты неполного сгорания, к основным из которых относятся оксид углерода, углеводороды, бенз(а)пирен, сажа;

2) вещества, являющиеся продуктами побочных реакций, протекающих при высоких температурах, например, оксиды азота;

3) вещества, образующиеся из компонентов топлива и смазочного масла, входящих в них в виде примесей и присадок.

Таблица 1.2

ПДК основных токсичных компонентов ОГ дизеля

Компонент ОГ	Класс опасности	Порог восприятия запаха, мг/л	Предельно допустимая концентрация, мг/м <sup>3</sup>		
			В воздухе рабочей зоны	Среднесуточная в атмосфере населенных пунктов	Максимальная разовая
Оксиды азота (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	2	9,0002–0,008	2,0	0,04	0,085
Моноксид углерода CO	4	–	20,0	3,0	5,0
Углеводороды CH <sub>x</sub> (в пересчете на C)	2–4	0,0007–0,6	–	1,5	5,0
Сажа	3	–	4,0*	0,05	0,15
Альдегиды RCHO, в том числе:	2–3	0,00007–0,004	0,2–5	0,01–5,0	0,01–3,0
формальдегид HCHO	2	0,00007-0,004	0,5	0,012	0,035
акролеин CH <sub>2</sub> CHCHO	2	0,00007	0,7	0,03	0,03
Диоксид серы SO <sub>2</sub>	3	0,00087-0,003	10	0,05	0,05
Триоксид серы SO <sub>3</sub>	2	-	1,0	–	–
Бенз(а)пирен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	1	-	15 10 <sup>-5</sup>	1 10 <sup>-6</sup>	–

\* – для сажи промышленной с содержанием бенз(а)пирена не более 35 мг/кг.

## 1.1. Оксид углерода

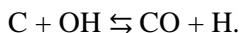
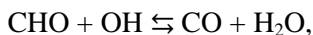
Оксид углерода (монооксид СО – угарный газ) – бесцветный газ без запаха и вкуса, плохо растворим в воде, горюч (образует с воздухом взрывчатые смеси), попадая в легкие человека, а оттуда в кровь, вытесняет из нее кислород, так как обладает в 200 раз большей растворимостью. В результате снижения содержания кислорода в крови возникает удушье. Оксид углерода является продуктом неполного сгорания топлива, на воздухе горит синим пламенем с образованием диоксида углерода (углекислого газа). Оксид углерода вызывает торможение функций активных центров образования гемоглобина, вследствие чего нарушаются окислительные процессы в организме, что может привести к смерти (объемная концентрация 0,3 % может привести к смерти человека в течение 30 мин). Особое внимание следует обратить на явление хронического отравления небольшими дозами оксида углерода, которое может наступить при объемной концентрации СО, равной 0,01 %. Отравлению такого рода подвержены водители, работники службы организации движения и пешеходы в больших городах. Около 95 % оксида углерода, вдыхаемого пешеходами, попадает в воздух с отработавшими газами АТС. Хроническое отравление выражается в появлении головных болей, шума в ушах, затрудненного дыхания, общей депрессии и понижении работоспособности. В ряде случаев отравление СО может послужить причиной ДТП, так как даже при небольшом уровне загрязнения у водителя заметно снижается внимание и замедляется реакция. Клинические проявления интоксикации зависят от дозы (концентрации) и продолжительности воздействия СО на человека.

Оксид углерода так же, как углеводороды и сажа, – продукт неполного сгорания топлива и масла. При этом, в отличие от механизма распада исходных углеводородов топлива и масла на более легкие углеводороды, образование СО в основном идет в зонах с более высокой температурой. Вторым источником образования СО является процесс диссоциации СО<sub>2</sub> в зоне высоких (более 2000 К) температур (т. е. в зоне фронта пламени).

Оксид углерода в ряде стран считается основным токсичным веществом. По отношению к СО определяется относительная токсичность других основных компонентов отработавших газов АТС.

Оксид углерода присутствует в атмосфере в очень малых количествах, а в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания его содержание может достигать весьма значительных величин (до 12 % в бензиновых двигателях, работающих на режимах холостого хода). Дизельные двигатели отличаются сравнительно небольшой концентрацией этого токсичного компонента ОГ, не превышающей 0,5 %. Оксид углерода СО менее стабилен по сравнению с диоксидом СО<sub>2</sub>.

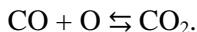
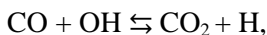
В камере сгорания (КС) дизеля углеводороды, кислород, пары воды распадаются с образованием углеводородных радикалов типа СН<sub>3</sub>, углерода, атомарного кислорода и водорода, групп ОН и СНО, в результате рекомбинаций которых (*процессы, обратные разрыву химических связей*) образуется монооксид углерода, например, по реакции



Имеет место и диссоциация (*разделение элементов любой совокупности на молекулярные элементы*) диоксида углерода:



При последующем сгорании на такте расширения или в выпускном трубопроводе монооксид углерода окисляется до диоксида только в присутствии водяного пара или водорода:



Основная причина образования СО в КС дизеля – неравномерное распределение топлива в зоне горения с образованием участков с низким коэффициентом избытка воздуха, что приводит к недогоранию части топлива. Кроме того, образование СО происходит и в высокотемпературной зоне топливного факела, где химическое равновесие смещено в сторону диссоциации диоксида углерода СО<sub>2</sub> с образованием СО и О<sub>2</sub> по приведенной выше реакции. Концентрация СО уменьшается при сгорании бедных смесей и увеличивается при сгорании богатых (рис. 1.2).

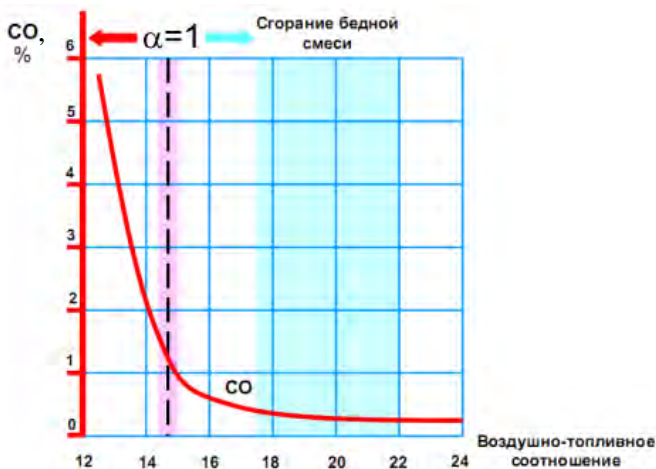


Рис. 1.2. Зависимость концентрации оксида углерода в ОГ от состава смеси

Оксид углерода представляет собой основной промежуточный продукт сложного многостадийного процесса горения углеводородных топлив. Горение оксида углерода возможно при наличии кислорода в результате прохождения цепной реакции. Максимальная концентрация CO в камере сгорания дизеля может достигать нескольких процентов по объему, но в ОГ их не более 0,1–0,2 %, что объясняется интенсивным догоранием CO на тактах расширения и выпуска при достаточном избытке воздуха. Поэтому, как правило, концентрацию CO определяют только для бензиновых двигателей.

Причины повышенной концентрации CO в ОГ и картерных газах следующие:

1. Повышенное топливное давление.
2. Нарушение гидроплотности форсунок.
3. Разрыв диафрагмы регулятора давления топлива.
4. Неисправности системы улавливания паров топлива.
5. Попадание большого количества картерных газов во впускной коллектор.
6. Засорение клапана или отверстий системы принудительной вентиляции картера.
7. Неправильная работа системы обратной связи, приводящая к смещению регулирования в сторону обогащения смеси.

8. Ошибочный сигнал на входе блока управления двигателем – неверное определение нагрузки, температуры охлаждающей жидкости, количества  $O_2$ , положения дроссельной заслонки.

Недостаток кислорода является основной причиной повышенных выбросов с ОГ бензиновых двигателей продуктов неполного сгорания, и в первую очередь оксида углерода. При работе бензинового двигателя даже на стехиометрической смеси концентрация оксида углерода в ОГ не равна нулю, а составляет порядка 1 %. Это объясняется неравномерным распределением состава смеси по цилиндрам и наличием обогащенной смеси в отдельных цилиндрах при стехиометрическом и даже обедненном ее составе в целом для двигателя. Содержание CO в ОГ бензинового двигателя, например при неправильной регулировке системы питания, может достигать 10 %.

## 1.2. Углеводороды

Из всех продуктов сгорания углеводороды представлены наиболее широко и разнообразно: в ОГ насчитывают более 200 отдельных веществ, которые в основном отличаются между собой по количеству атомов углерода в молекуле. При этом состав углеводородов, присутствующих в ОГ, отличается от исходного состава углеводородов топлива и масла, поскольку под воздействием высокой температуры происходит их термический распад. В отдельных случаях возможно наличие в ОГ и исходных углеводородов:

– в ДВС с внешним смесеобразованием – вследствие продувки цилиндра при перекрытии клапанов, а также в случае пропусков воспламенения смеси;

– двигателях с воспламенением от сжатия – вследствие продувки и при отсутствии самовоспламенения.

Процесс сгорания топлива в ДВС протекает очень быстро, при этом реакции сгорания углеводородов в КС двигателя являются весьма сложными и недостаточно изученными. Известно, что реакции сгорания углеводородов относятся к типу цепных реакций с разветвлениями, при которых большое значение имеют цепи, образуемые от основной цепи. Характер протекания реакций зависит от температуры и давления в камере сгорания, способа образования рабочей смеси и способа ее воспламенения.

Углеводороды играют активную роль в образовании биологически активных веществ, вызывающих раздражение глаз, горла, носа и их заболевание и наносящих ущерб растительному и животному миру, оказывают наркотическое действие на центральную нервную систему и могут являться причиной хронических заболеваний, а некоторые ароматические СН обладают отравляющими свойствами, при определенных метеорологических условиях активно способствуют образованию смога. Резкое увеличение в последние десятилетия числа заболеваний раком легких, особенно в крупных городах, многие исследователи связывают именно с повышением содержания канцерогенов в атмосферном воздухе.

Эта многочисленная углеводородная группа соединений представляет следующие гомологические ряды: парафины, олефины, нафтены, ароматические углеводороды (в том числе полициклические ароматические углеводороды – ПАУ). Наиболее значимыми из них являются легкие газообразные углеводороды и ПАУ. Легкие газообразные углеводороды  $C_xH_y$  образуются при термическом распаде топлива в переднем фронте факела, на топливной пленке на стенках цилиндра и в результате вторичного впрыскивания топлива (подвпрыскивания). Механизм образования углеводородов  $C_xH_y$  зависит от конструкции дизеля и параметров его работы. Одна из основных причин образования углеводородов  $C_xH_y$  – наличие «холодных» пристеночных слоев в цилиндре дизеля (рис. 1.3).

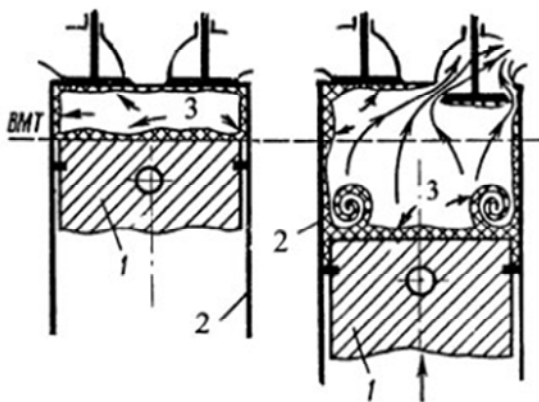


Рис. 1.3. Зоны гашения пламени:

1 – поршень; 2 – гильза цилиндра; 3 – топливная пленка

В процессе сгорания топлива пламя распространяется к стенке, от которой отводится теплота, и радикалы, образовавшиеся при горении, рекомбинируются на холодных стенках. В результате в пристеночных холодных слоях цилиндров толщиной 0,005–0,3 мм остаются углеводородные частицы из нагретого, не до конца сгоревшего топлива.

Другой причиной образования углеводородов  $C_xH_y$  является наличие в камере сгорания зон с низким коэффициентом избытка воздуха, в которых остаются несгоревшие углеводороды топлива. Несгоревшие углеводороды остаются в зазорах, которые малы для распространения пламени (между поршнем и стенкой цилиндра, над первым поршневым кольцом, вокруг клапанов), а также в локальных переобогащенных зонах объема камеры сгорания, где происходит пиролиз (*термическое разложение органических и многих неорганических соединений, в том числе и при недостатке кислорода*). Рост количества несгоревших углеводородов наблюдается и при работе двигателя на переобедненных смесях вследствие гашения пламени или пропуска зажигания. Кроме того, СН образуются в зонах срыва пламени, ядре, хвосте струи, на топливной пленке, стенках и в результате более позднего вторичного впрыска топлива. Источником углеводородов также являются процессы подвпрыска топлива из форсунки при неконтролируемом отскоке иглы распылителя от седла, а также подтекание топлива из распылителя форсунок за счет наличия остатков топлива в подыгольном пространстве распылителя или его негерметичности. В обоих случаях давления топлива недостаточно для качественного смесеобразования и попадающее в КС таким образом топливо будет образовывать переобогащенные зоны. Состав смеси оказывает ощутимое влияние на эмиссию СН (рис. 1.4).

Среди низкомолекулярных углеводородов  $C_xH_y$  наибольшей токсичностью отличаются углеводороды олефинового ряда (этилен  $C_2H_4$ , пропилен  $C_3H_6$ , бутилен  $C_4H_8$ ) и в меньшей степени парафины (метан  $CH_4$ , этан  $C_2H_6$ , пропан  $C_3H_8$ , бутан  $C_4H_{10}$ ), вызывающие неприятный запах и раздражающее действие отработавших газов, многочисленные хронические заболевания сосудистой и нервной системы, поражение внутренних органов. В дизелях количество этих несгоревших углеводородов составляет 2–6 % от общего содержания углеводородных соединений в отработавших газах, а в бензиновых двигателях доходит до 14–58 %. Другие легкие углево-



дороды присутствуют в отработавших газах дизелей в значительно меньших количествах. При значительном содержании легких не-сгоревших углеводородов выхлопные газы имеют белый цвет (белый дым). Остальные углеводороды, присутствующие в отработавших газах, – это главным образом высокомолекулярные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ).

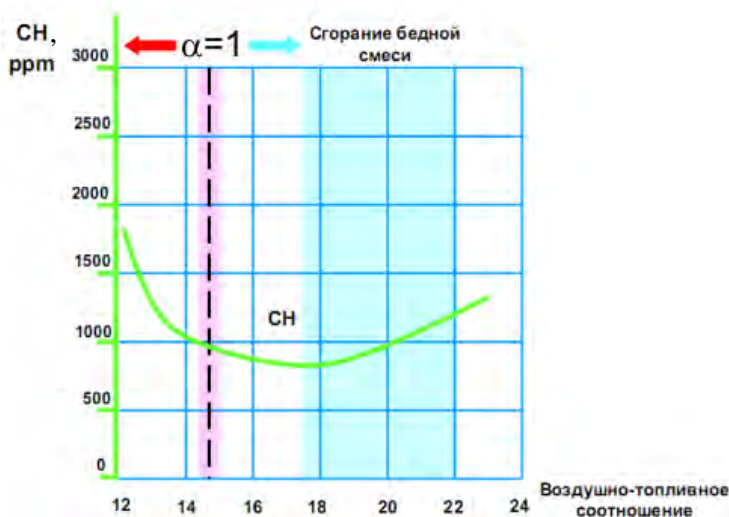


Рис. 1.4. Зависимость концентрации углеводородов в ОГ от состава смеси

Основой ПАУ является структура, называемая бензольным ядром, в которую входят шесть атомов углерода, соединенных в кольцо, с тремя одинарными и тремя двойными связями. Некоторые ПАУ кроме бензольного ядра имеют одну или несколько боковых цепей. В отработавших газах дизелей содержатся в основном углеводороды, в молекулы которых входят 2, 3 и 4 кольцевые структуры и 12–20 атомов углерода. Наиболее представительными из них являются неканцерогенные пирен, флуорантен и слаботоксичный хризен, а наиболее опасными, имеющими сравнительно высокую концентрацию в отработавших газах, – фенантрен  $C_{14}H_{10}$ , бензо(b)флуорантен, бензо(j)флуорантен и, особенно, бенз(a)пирен

$C_{20}H_{12}$ . Доля бенз(а)пирена в суммарном выбросе ПАУ составляет до 3,7 % у дизелей и 2,1–3,3 % у бензиновых двигателей. В камере сгорания дизеля ПАУ адсорбируются в виде твердых иглообразных образований на поверхности сажи.

Полициклические ароматические углеводороды, которые относятся к так называемым канцерогенным веществам, не выводятся из организма человека, а со временем накапливаются в нем, способствуя образованию злокачественных опухолей. На переменных режимах бенз(а)пирен образуется при разгонах и замедлениях, при этом количество выбрасываемого бенз(а)пирена повышается примерно в 10 раз и еще в 10 раз – при запуске холодного двигателя. Износ цилиндропоршневой группы и повышенный расход масла в десятки раз увеличивают содержание бенз(а)пирена в ОГ дизеля. Одной из причин образования бенз(а)пирена является наличие в топливе бензола и других ароматических соединений. В настоящее время содержание ароматических компонентов в топливах нормируется.

Кислородосодержащие углеводороды – альдегиды  $RCHO$  ( $R$  – углеводородный радикал) – являются продуктами неполного сгорания и образуются на ранних стадиях окисления углеводородов топлива. Среди них преобладают низкомолекулярные альдегиды – формальдегид  $HCHO$  и акролеин  $CH_3CHO$ . Первый представляет гомологический ряд насыщенных альдегидов, второй – ненасыщенных. В отработавших газах дизельных двигателей на долю формальдегида приходится 71–91 % от общего содержания альдегидов, на долю акролеина 9–22 %. Остальные 10–15 % составляет ряд других альдегидов (ацетальдегид, толуальдегид, бензальдегид, фурфурол). В целом в отработавших газах дизельных двигателей альдегидов содержится  $30 \text{ мг/м}^3$ , а в бензиновых двигателях содержание альдегидов может достигать  $240 \text{ мг/м}^3$ . Действие альдегидов на организм человека характеризуется раздражающим и общетоксическим эффектом на центральную нервную систему, поражением внутренних органов. Альдегиды обладают резким запахом, при определенных дозах вызывают раздражение дыхательных путей и слизистых оболочек носа и глаз.

При работе бензинового двигателя на обогащенных смесях из-за недостатка кислорода в большом количестве выбрасываются углеводороды, а по мере обеднения смеси количество их уменьшается, достигая минимума при  $\alpha = 1,1$ , а затем вновь возрастает. Минимум

выбросов СН (при  $\alpha = 1,1$ ) соответствует наиболее устойчивой работе двигателя и, как правило, наилучшей экономичности. Особенно много углеводородов выбрасывается на режимах холостого хода. В многоцилиндровых бензиновых двигателях при работе на режиме минимальной частоты вращения холостого хода концентрация СН в отработавших газах может достигать 0,5–0,7 %.

Причины повышенной концентрации СН в ОГ бензиновых двигателей могут быть следующие:

1. Неисправности деталей системы зажигания, приводящие к снижению вторичного напряжения, элементами которой являются:

– распределитель зажигания (в системе зажигания с распределителем);

– свечи зажигания;

– высоковольтные провода;

– катушки зажигания.

2. Переобеднение топливовоздушной смеси: подсос воздуха во впускной коллектор.

3. Неисправности системы рециркуляции EGR отработавших газов:

– исполнительный клапан системы EGR перепускает слишком большое количество отработавших газов или полностью открыт;

– неисправность электромагнитного клапана системы EGR;

– засорение или повреждение воздушных шлангов системы EGR.

4. Засорение топливных форсунок.

5. Неправильная работа системы обратной связи, приводящая к смещению регулирования в сторону обеднения смеси.

6. Ошибочный сигнал на входе блока управления двигателем – неверное определение нагрузки, температуры охлаждающей жидкости, количества  $O_2$ , положения дроссельной заслонки.

7. Утечка отработавших газов через выпускные клапаны:

– неправильно отрегулированный тепловой зазор выпускных клапанов (слишком маленький зазор);

– прогорание клапана или седла.

8. Нарушение работы системы зажигания:

– неверное значение базового угла опережения зажигания;

– неверный сигнал на входе блока управления двигателем.

9. Большое количество картерных газов: износ поршневых колец или цилиндров двигателя.

10. Низкая компрессия.

11. Отложения нагара на впускных клапанах.

12. Оседания топлива на стенках впускного трубопровода и впускного клапана. Это топливо постепенно сносится потоком топливовоздушной смеси в камеру сгорания, приводя к переобогащению рабочей смеси в КС и нестабильности рабочих циклов.

13. Попадание смазочного масла в КС из зазоров между поршнем и цилиндром, а также между направляющими втулками и стержнями впускного и выпускного клапанов.

14. Вынос части топливовоздушной смеси из впускного трубопровода в выпускной при перекрытии впускного и выпускного клапанов.

На выбросы СН в ДВС с внутренним смесеобразованием (в дизелях, а также в двигателях с принудительным воспламенением и непосредственным впрыском топлива в КС) оказывают влияние факторы:

- физические характеристики топлива (вязкость, температура);
- характеристики топливоподдачи (геометрия и количество топливных факелов, мелкость распыливания);
- характер движения воздушного заряда (интенсивность вихря, направленность, турбулентность, температура, плотность);
- доля топлива, перемешавшегося с воздушным зарядом за период задержки воспламенения;
- момент начала впрыскивания топлива относительно верхней мертвой точки;
- продолжительность впрыскивания;
- изменение температуры продуктов сгорания в цилиндре на такте сгорания – расширения;
- теплоотдача в стенки цилиндра, головки и поршня и т. д.

В ОГ дизелей концентрация углеводородов ниже в пять–семь раз по сравнению с ДВС с внешним смесеобразованием, что обусловлено значительно меньшим временем пребывания топлива в КС до момента воспламенения. Результатом является незначительное количество топливовоздушной смеси, располагающейся в холодной пристеночной зоне.

В случае использования газообразного топлива (особенно метана) концентрация углеводородов в ОГ обычно еще выше, чем при использовании бензина. Связано это с низкой скоростью распространения пламени по метано-воздушной смеси, приводящей к повышенной теплоотдаче из зоны горения, что обуславливает затягивание процесса горения и увеличение доли горения на линии рас-

ширения при пониженных температурах (рис. 1.5). Внешним проявлением избыточного содержания углеводородов в ОГ является густой серо-белый дым.

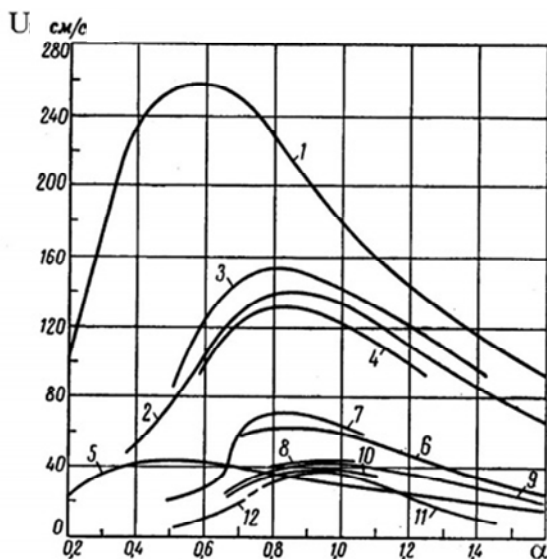


Рис. 1.5. Скорость распространения пламени в зависимости от углеводородного состава смеси: 1 – водород  $H_2$ ; 2–4 – ацетилен  $C_2H_2$ ; 5 – окись углерода  $CO$ ; 6 и 7 – этилен  $C_2H_4$ ; 8 – пропилен  $C_3H_6$ ; 9 – пропан  $C_3H_8$ ; 10 – бензол  $C_6H_6$ ; 11 и 12 – метан  $CH_4$

Распад исходного углеводородного топлива состава  $C_xH_y$  в ходе рабочего процесса на более простые углеводороды обуславливает наличие в ОГ, как минимум, нескольких десятков (а то и сотен) представителей этих химических соединений. В условиях переменного объема КС горение может быть прервано на любой стадии, поэтому точная оценка группового состава углеводородов, содержащихся в ОГ, возможна только экспериментально.

Расчетный анализ процесса горения углеводородов невозможен в связи с крайне высокой сложностью и многоступенчатостью этого процесса. Даже в случае полного сгорания простейшего углеводорода – метана  $CH_4$  – процесс может иметь до 200 промежуточных стадий, а для более тяжелых углеводородов количество стадий увеличивается до нескольких тысяч (табл. 1.3).

Таблица 1.3

## Горение некоторых топлив в воздухе

Топливо	Водород $H_2$	Метан $CH_4$	Пропан $C_3H_8$	Гексан $C_6H_{14}$	Цетан $C_{16}H_{34}$
Количество стадий реакции	25	200	400	1500	7000
Количество продуктов реакции	7	30	100	450	1200

Дизельное топливо по своему среднему молекулярному составу близко к цетану.

### 1.3. Сажа

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

Таким образом, в отработавших газах ДВС присутствуют не только газообразные вещества, но и твердые образования, размеры которых соизмеримы с размерами частиц пыли. Эти образования, получившие общее название дисперсные частицы (PM – particle matter), считаются вредными для здоровья людей и загрязняющими среду обитания. Дисперсные частицы – совокупное определение всех твердых и жидких (кроме воды) веществ, находящихся в воздухе, которые (в отличие от газообразных веществ) имеют геомет-

рический размер, характеризуемый таким параметром, как аэродинамический диаметр (АД).

*Аэродинамический диаметр – диаметр частицы с плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ , имеющий ту же скорость оседания в воздухе, что и данная частица. АД характеризует способность частиц перемещаться в воздухе, на что влияет не только их плотность, но и форма частиц.*

В двигателестроении под дисперсными частицами понимаются все твердые и жидкие (кроме воды) вещества, находящиеся в смеси отработавших газов и воздуха при температуре смеси не более  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ . Дисперсные частицы, имеющие аэродинамический диаметр не более  $2,5 \text{ мкм}$ , обозначают РМ<sub>2,5</sub>; частицы размером  $2,5\text{--}10 \text{ мкм}$  – РМ<sub>10</sub>. Частицы с АД более  $10 \text{ мкм}$  практически полностью задерживаются в ротовой и носовой полостях, а частицы с АД не более  $0,5 \text{ мкм}$  полностью выдыхаются. Соответственно наибольший вред человеку наносят частицы с АД =  $0,5\text{--}10,0 \text{ мкм}$ .

К твердым веществам дисперсных частиц относятся сажа С (углерод), твердые сульфаты и часть суммарных углеводородов с углеродным числом от  $\text{C}_{18}$  и выше. При этом в сажу переходит около  $25 \%$  масла, попавшего в КС и сгоревшего (полностью или частично): это количество масла определяет значение такого показателя, как «расход масла на угар». Кроме того, к РМ относятся зола и кокс топлива и масла, а также продукты износа деталей двигателя. Однако содержание золы, кокса и продуктов износа незначительно, поэтому отдельно их выделяют только в случае определения химического состава РМ. Жидкая часть РМ представлена частью суммарных углеводородов с углеродным числом от  $\text{C}_5$  до  $\text{C}_{17}$ , а также парами серной кислоты.

Механизм образования сажи характерен для двигателей как с внутренним, так и внешним смесеобразованием, в том числе и для газовых двигателей. Однако разница в типах смесеобразования приводит к тому, что в ДВС с внешним смесеобразованием в связи с большей долей топлива, перемешанного с окислителем, сажи в массовом выражении на единицу массы топлива меньше, и она меньше по размерам по сравнению с дизельной сажой. Последнее обстоятельство приводит к более длительному существованию в воздухе именно частиц сажи от бензиновых двигателей, а соответственно – и большему вреду, наносимому окружающей среде.

Однако именно двигатели с внутренним смесеобразованием (двигатели с непосредственным впрыском топлива в камеру сгорания, т. е. не только дизели, но и соответствующие ДВС с принудительным воспламенением) отличаются повышенной склонностью к сажеобразованию. Любое топливо (даже газообразное) при реализации диффузионного типа горения образует сажу.

Сажа является основой так называемых твердых частиц (ТЧ), в состав которых входят также адсорбированные на поверхности сажи тяжелые углеводороды, зольные частицы, некоторые продукты износа и т. д. (рис. 1.6). Наличие сажи в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания приводит к потере их прозрачности (увеличению оптической плотности) и появлению облака дыма черного цвета. Оптическая плотность отработавших газов зависит от количества и размеров частиц сажи. Видимое дымление дизелей соответствует содержанию сажи в отработавших газах более  $1,1 \text{ г/м}^3$ . В отличие от дизелей в бензиновых двигателях дымность практически отсутствует.

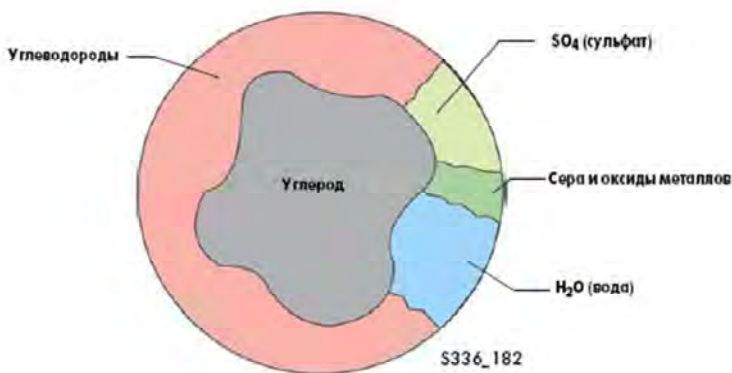


Рис. 1.6. Условное изображение твердой частицы

Сажа представляет собой частицы твердого углерода неправильной формы (рис. 1.7) с линейными размерами  $0,3\text{--}100 \text{ мкм}$  (преимущественно от  $0,2$  до  $1,0 \text{ мкм}$ ). Первичные структуры сажи, образующиеся в камерах сгорания дизелей, являются частицами сферической формы диаметром  $0,015\text{--}0,17 \text{ мкм}$  с удельной геометрической поверхностью  $75 \text{ м}^2/\text{г}$ , которые из-за коагуляции в процессе



сгорания образуют вторичные и третичные структуры, выбрасываемые с ОГ из системы выпуска дизеля в атмосферу. Большая часть сажевых образований имеет размеры 0,4–5 мкм.

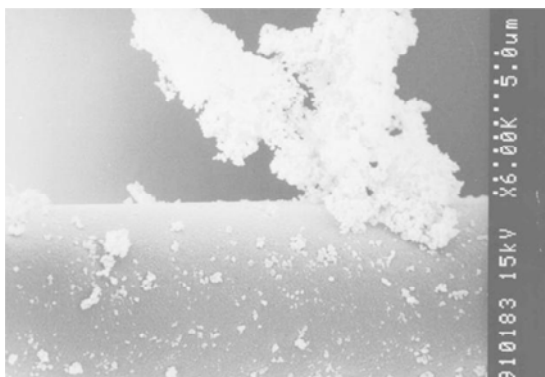
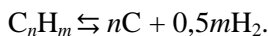


Рис. 1.7. Сажа дизельного двигателя

Удельная поверхность сажи значительна и может достигать 300 м<sup>2</sup>/г, а ее плотность довольно низка – 0,05 г/см<sup>3</sup>. Измерения размеров этих частиц показали, что их распределение по величине практически не зависит от способа смесеобразования, т. е. у двигателей с вихревой камерой сгорания и у двигателей с непосредственным впрыском посредством системы Common Rail или насос-форсунок оно примерно одинаково.

Сажа вызывает негативные изменения в системе дыхательных органов человека. Мелкие частицы сажи размером 0,5–2 мкм задерживаются в легких, дыхательных путях, вызывают аллергию. Сажа загрязняет воздух, ухудшает видимость, но самое опасное в том, что на саже адсорбируются тяжелые ароматические углеводороды, в том числе канцерогенный бенз(а)пирен С<sub>20</sub>Н<sub>12</sub>, который является индикатором наличия в отработавших газах других ПАУ.

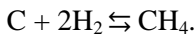
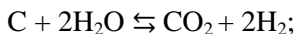
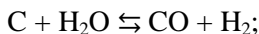
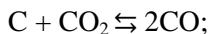
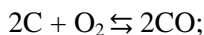
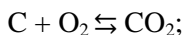
*Образование сажи* – объемный процесс термического разложения углеводородов при сильном недостатке или отсутствии кислорода (пиролизе), происходящий при значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,33–0,7$ . При таких  $\alpha$  реакция разложения молекул углеводородного топлива происходит по общей формуле



С ростом температуры и давления в зоне пиролиза количество образовавшейся сажи резко увеличивается. При этом с увеличением температуры начало образования сажи сдвигается в сторону более богатых смесей, а с увеличением давления – в сторону более бедных. Установлено, что образование сажи зависит от свойств топлива. Чем выше молекулярный вес топлива, тем выше скорость образования сажевых частиц. Выявлено также, что концентрация сажи тем больше, чем выше отношение С/Н в топливе.

Наряду с образованием сажи происходит и ее выгорание при столкновении частичек сажи с кислородом или радикалами ОН, т. е. часть образовавшейся сажи, которая диффундирует из зоны своей наибольшей концентрации через фронт пламени в сторону избытка окислителя, сгорает. Та же часть сажи, которая диффундирует внутрь, т. е. в сторону жидкого топлива, не сгорает, обуславливая содержание сажи в отработавших газах ДВС. Количество образующейся сажи пропорционально цикловой подаче топлива, т. е. нагрузке на двигатель. Скорость выгорания сажи значительно меньше скорости выгорания газообразных продуктов неполного сгорания и существенно зависит от размеров частиц.

Окисление сажи происходит по следующим основным реакциям:



Твердые частицы в ОГ дизеля с наддувом на 68–75 % состоят из нерастворимых частиц и на 25–32 % – из растворимых.

Сажа не единственное твердое вещество, содержащееся в отработавших газах. Другие твердые вещества – сульфаты (серосодер-

жащие соли) образуются при сгорании серы и ее соединений, содержащихся в топливе. Выброс сульфатов в атмосферу с отработавшими газами дизельных двигателей составляет 5–11 мг на километр пробега транспортного средства, а с отработавшими газами бензиновых двигателей 1–13 мг.

Образование диоксида серы  $SO_2$  в камере сгорания дизеля также обусловлено содержанием в топливе серы и ее соединений (элементарной серы S, сероводорода  $H_2S$ , меркаптанов  $RSH$  и др.). При высокой температуре и избытке кислорода они сгорают с образованием оксидов серы  $SO_2$  и  $SO_3$ . Оксиды серы, реагируя с парами воды воздуха, образуют кислоты – сернистую  $H_2SO_3$  и серную  $H_2SO_4$ . Образование этих кислот ускоряется оксидами азота и углеводородами, содержащимися в отработавших газах. Эти кислоты способствуют возникновению смога и «кислотных дождей», закислению почв, увеличению кислотности водоемов.

Кроме того, в выхлопных газах присутствуют твердые вещества, образующиеся в результате сгорания моторного масла, попадающего в камеру сгорания, а также металлы (железо Fe, никель Ni, медь Cu, цинк Zn и др.) и их оксиды, являющиеся продуктами износа деталей двигателя и компонентами присадок к топливу и моторному маслу. При большом угаре масла выхлопные газы могут иметь голубоватый оттенок (голубой дым).

#### 1.4. Оксиды азота

Наибольший экологический ущерб от выбросов вредных веществ, образующихся в камере сгорания дизеля, приходится на оксиды азота ( $NO_x$ ), которые представлены следующим рядом: NO,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $N_2O_3$ ,  $N_2O_4$ ,  $N_2O_5$ . При этом установлено, что из всех оксидов азота, содержащихся в отработавших газах, на долю NO в двигателях с принудительным зажиганием приходится 98,0–99,5 %, а у дизелей – до 95–98 %. Причем сорт сжигаемого топлива не оказывает существенного влияния на образование оксидов азота в камере сгорания. Из оксидов азота  $NO_x$ , содержащихся в отработавших газах дизелей, 80–90 % приходится на монооксид азота NO и 10–20 % – на диоксид азота  $NO_2$ . Содержание других газообразных оксидов азота в отработавших газах ничтожно мало. Монооксид азота является нестабильным компонентом. В атмосфере при нормальных условиях монооксид азота NO окисляет-

ся до диоксида  $\text{NO}_2$  в течение от 0,5 до 100 часов, в зависимости от его концентрации в воздухе. При понижении температуры ОГ в атмосфере  $\text{NO}$  окисляется до  $\text{NO}_2$ . В диапазоне температур 135–21 °С  $\text{NO}_2$  находится в смеси с  $\text{N}_2\text{O}_4$ , а при температуре ниже 21 °С полностью переходит в  $\text{N}_2\text{O}_4$ .

Эмиссия даже небольшого количества  $\text{NO}_2$  представляет серьезную проблему из-за высокой токсичности этого компонента ОГ и его активного участия в фотохимических реакциях в атмосфере. Оксиды азота действуют раздражающе на слизистые оболочки глаз, носа, остаются в легких в виде азотной и азотистой кислот. Опасность воздействия заключается в том, что отравление организма проявляется не сразу, а постепенно, причем каких-либо нейтрализующих средств нет. Закись азота  $\text{N}_2\text{O}$  (гемиоксид, веселящий газ) – газ с приятным запахом, хорошо растворим в воде, обладает наркотическим действием. Диоксид азота  $\text{NO}_2$  – бурый газ с удушливым запахом, реагирует с водой с образованием азотистой  $\text{HNO}_2$  и азотной  $\text{HNO}_3$  кислот, которые разрушают легочную ткань, вызывая хронические заболевания, необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе. Диоксид азота используется в качестве окислителя в ракетном топливе. Опасной является концентрация, составляющая более 1–2 ppm. Считается, что для организма человека оксиды азота примерно в 10 раз опаснее  $\text{CO}$ , а при учете вторичных превращений – в 40 раз. Оксиды азота в соединении с углеводородами образуют токсичные нитроолефины. Установлено, что их непосредственное токсичное влияние на растения проявляется при концентрации  $\text{NO}_x$  в воздухе в пределах 0,5–6,0 мг/м<sup>3</sup>.

Выделяют следующие механизмы образования оксидов азота: термический, быстрый, топливный.

Образование оксида азота  $\text{NO}$  по термическому механизму происходит в зоне продуктов сгорания при высокой температуре (свыше 2000 °С) в результате окисления атмосферного азота свободным кислородом. При этом если образование продуктов неполного сгорания топлива определяется в основном несовершенством организации процесса сгорания, то образование  $\text{NO}_x$  – совершенством упомянутого процесса с точки зрения эффективности использования энергии топлива. Чем выше максимальная температура цикла, тем выше его коэффициент полезного действия и тем больше образуется оксидов азота (рис. 1.8).

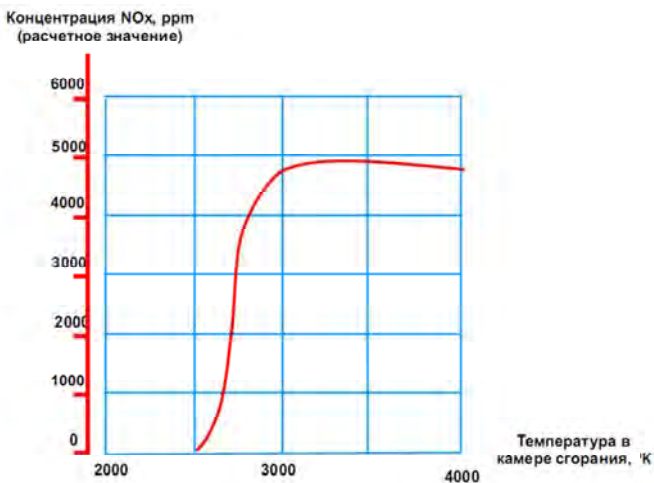


Рис. 1.8. Зависимость концентрации NO<sub>x</sub> от температуры в камере сгорания

При горении богатой смеси эмиссия NO<sub>x</sub> уменьшается, что связано с недостатком свободного кислорода (рис. 1.9). В точке, когда отношение воздух-топливо примерно равно 16 : 1, концентрация NO достигает максимального значения. Это объясняется увеличением температуры в камере сгорания, которая при таком составе смеси достигает максимальных значений.

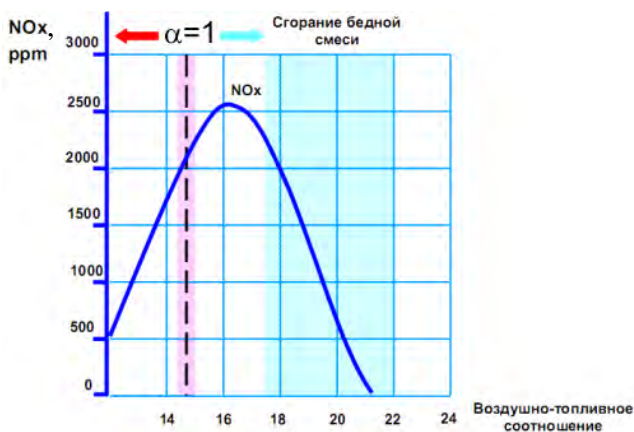
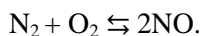
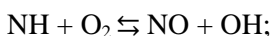
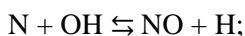
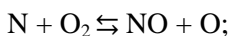
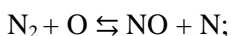


Рис. 1.9. Зависимость концентрации оксидов азота в ОГ от состава смеси

Согласно общепринятой теории термического механизма Я.Б. Зельдовича окисление азота воздуха в топливовоздушной смеси происходит за фронтом пламени с температурой выше 2000 К в зоне продуктов сгорания при взаимодействии свободных радикалов O и N. При этом скорость образования NO значительно ниже скорости сгорания, поэтому основная часть NO образуется после завершения горения:



Основные положения этой теории можно сформулировать следующим образом.

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

2. Образование оксида азота определяется максимальной температурой горения, концентрациями азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в сгорании (при отсутствии в топливе азота).

3. Окисление азота происходит по цепному механизму. Определяющей является реакция  $\text{O} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N}$ , скорость которой зависит от концентрации атомарного кислорода.

4. Выход оксидов азота зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания.

5. В бедных смесях (при малой подвижности реакции) выход NO определяется максимальной температурой сгорания, т. е. кинетикой его образования. В богатых смесях выход NO определяется кинетикой разложения, т. е. закалкой образовавшейся окиси азота.

б. Махе-эффект ощутимо влияет на образование NO при горении бедных смесей и слабо при горении богатых.

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

Согласно быстрому механизму образования NO используется схема связывания молекулы азота углеводородными радикалами CN и CH<sub>2</sub> во фронте пламени. Образовавшиеся азотные соединения быстро окисляются до NO, в том числе и через промежуточные реакции. В отличие от термического механизма, реакции протекают при значительно низких температурах, так как энергетические затраты, необходимые для осуществления этих реакций, малы. Скорость образования NO по быстрому механизму значительно выше, чем по термическому.

Топливный механизм образования NO заключается в участии азота, содержащегося в топливе, в реакциях окисления. При этом азот топлива легче вступает в реакцию, чем атмосферный азот.

В нефтепродуктах содержится до 5 % азотистых соединений, из которых основными являются пиридин (*шестичленное ароматическое соединение с одним атомом азота*) и его производные. Однако установлено, что для бензинов и дизельных топлив, получаемых из нефти, можно не учитывать реакции с топливным азотом из-за его низкого содержания. В то же время для тяжелых топлив и мазутов пренебрегать содержанием топливного азота нельзя.

Основная роль принадлежит термическим оксидам азота, роль же двух других источников по мере повышения температур и давлений при горении уменьшается. Для условий горения в ДВС, где при сгорании углеводородовоздушных смесей (содержащих крайне незначительное количество азота в топливе) развиваются достаточно высокие температуры (2000–2800 К), термический механизм носит решающий характер.

Исследования, проведенные с помощью стробоскопического газоотбора, показали, что время образования основного количества оксида азота занимает от  $2,2 \cdot 10^{-3}$  до  $6,2 \cdot 10^{-3}$  с (20–30 град. ПКВ).

В ДВС с внутренним смесеобразованием часть топлива, перемешанного с окислителем за период задержки воспламенения, сгорает по механизму, присущему ДВС с внешним смесеобразованием, а остальная часть топлива – по мере поступления во фронт пламени. Соотношение этих частей топлива зависит от ряда конструктивно-регулирующих параметров двигателя, а также от состояния воздушного заряда, поступающего в цилиндр двигателя на такте впуска.

Указанное различие в механизмах сгорания в обоих типах ДВС определяет различие в концентрациях  $\text{NO}$  в продуктах сгорания, а соответственно и в отработавших газах. Связано это с тем, что время сгорания топлива в ДВС с внешним смесеобразованием меньше, т. е. меньше теплотери из фронта горения, а также больше влияние Махе-эффекта. При этом при прохождении фронта пламени происходит резкое охлаждение продуктов сгорания и образовавшегося оксида азота, что приводит к закалке  $\text{NO}$ .

В случае же диффузионного горения относительная длительность существования фронта пламени обуславливает возможность разложения оксида азота при его диффузии из зоны максимальной концентрации в поле переменных температур и концентраций кислорода. Таким образом, при одной и той же массе сгорающего топлива эмиссия  $\text{NO}$  с ОГ в этих двигателях будет меньше, чем в ДВС с внешним смесеобразованием, что и наблюдается на практике.

Причинами повышенной концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ бензиновых двигателей могут быть:

1. Неисправности системы охлаждения:

– недостаточное охлаждение радиатора воздушным потоком (засорение или некачественная работа системы управления вентилятором);

– недостаточное количество охлаждающей жидкости;

– заедание термостата в закрытом или слегка приоткрытом положении;

– засорение радиатора или системы охлаждения.

2. Переобеднение топливовоздушной смеси из-за подсоса воздуха во впускной коллектор.

3. Неправильная работа системы обратной связи, приводящая к смещению регулирования в сторону обеднения смеси.

4. Нарушение работы системы обратной связи по причине неисправности кислородного датчика:



- низкая частота переключения кислородного датчика;
- смещение напряжения (увеличение) средней точки переключения кислородного датчика.

5. Нарушение или неэффективная работа системы рециркуляции отработавших газов EGR:

- засорение каналов, приводящее к уменьшению количества перепускаемых газов;
- неисправность исполнительного клапана системы EGR;
- неисправность электромагнитного клапана системы EGR;
- отсутствие управляющего сигнала на электромагнитном клапане системы EGR;
- засорение отверстий, расположенных на дроссельной заслонке;
- засорение или повреждение воздушных шлангов системы EGR.

6. Нарушение работы системы зажигания:

- неверное значение базового угла опережения зажигания;
- неверный сигнал на входе блока управления двигателем;
- нарушение работы системы обратной связи при использовании датчика детонации.

7. Отложения нагара на впускных клапанах.

## **1.5. Попутные компоненты отработавших газов**

Кроме вредных компонентов (см. табл. 1.1) в отработавших газах содержатся азот  $N_2$ , кислород  $O_2$ , углекислый газ  $CO_2$ , пары воды  $H_2O$ , окислы серы и др.

Азот негорюч, бесцветен и не имеет запаха. Он входит в элементарный состав воздуха, которым мы дышим (78 % воздуха приходится на азот, 21 % – на кислород и 1 % – на прочие газы). В составе воздуха азот поступает в двигатель и присутствует при сгорании топлива в нем. Основная часть поступившего в двигатель азота вновь выбрасывается в неизменном состоянии в составе ОГ, но небольшая его часть вступает в реакцию с кислородом, образуя оксиды. Добавка за счет азота, содержащегося в топливе, незначительна, так как его концентрация в топливе не превышает 5,0 % (и то только в тяжелых топливах, а в дизельном и бензине его нет).

CO<sub>2</sub> (двуокись углерода, углекислый газ) – бесцветный и негорючий газ, который образуется в результате сгорания топлива, содержащего углерод. При полном сгорании 1 кг углерода образуется 3,67 кг CO<sub>2</sub>. Концентрация CO<sub>2</sub> в ОГ дизелей находится в пределах 1,0–10,0 %, а в ДВС с принудительным воспламенением 2,0–12,0 %. Этот газ попал в поле зрения общественности в связи с дискуссиями о возможных изменениях климата в результате действия парникового эффекта. Углекислый газ CO<sub>2</sub> уменьшает слой атмосферы, защищающий землю от солнечных ультрафиолетовых лучей, что приводит к дополнительному нагреву земной поверхности. Концентрация CO<sub>2</sub> в ОГ ДВС достигает максимума при стехиометрическом составе смеси и служит хорошим индикатором эффективного сгорания. Снижение концентрации CO<sub>2</sub> в отработавших газах происходит в случае отклонения состава смеси от стехиометрического, наличия пропусков воспламенения или неполадок в двигателе, приводящих к нарушению процессов сгорания (рис. 1.10). Значение эмиссии CO<sub>2</sub> с отработавшими газами пропорционально расходу топлива.

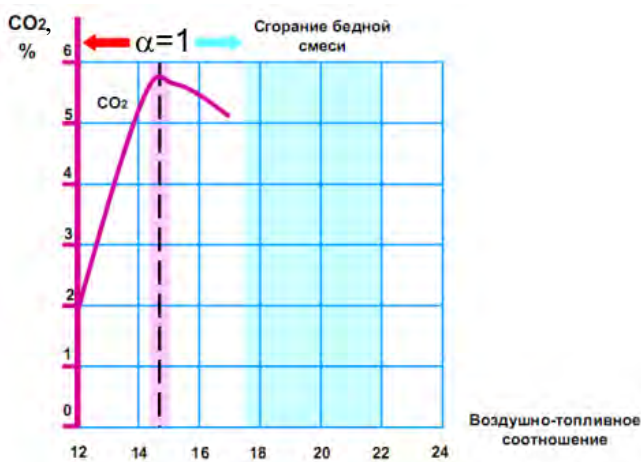
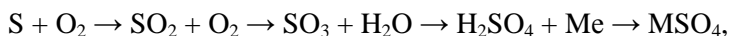


Рис. 1.10. Зависимость концентрации CO<sub>2</sub> в ОГ от состава смеси

Снизить выбросы CO<sub>2</sub> позволяет переход на использование в качестве топлива природного сжатого газа. Снижение выбросов CO<sub>2</sub>

возможно также при осуществлении непосредственно на двигателе конверсии природного газа с водяным паром и  $\text{CO}_2$ , частично извлекаемым из ОГ, с одновременным использованием их теплоты и энергии, уходящей в охлажденную среду, так как конверсионные реакции являются эндотермическими. При такой реализации конверсии теплоиспользование в ДВС получается более высоким, так как возникающий в результате конверсии синтезированный газ имеет более высокую теплотворную способность, чем исходное газовое топливо. Такие же положительные эффекты дает использование по аналогичной схеме спиртового топлива — метанола. Следующим шагом по уменьшению выбросов  $\text{CO}_2$  является использование водорода в качестве моторного топлива.

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



где  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  – сернистый и серный ангидриды;

$\text{H}_2\text{SO}_4$  – серная кислота;

Me – металл, барий Ba и кальций Ca, являющиеся моющими присадками смазочного масла;

$\text{MSO}_4$  – соль серной кислоты.

$\text{SO}_2$  – бесцветный негорючий газ с резким запахом, раздражающе действующий на кровеносные органы – костный мозг и селезенку, а также вызывающий нарушения в обмене углеводов. Хроническое отравление малыми дозами двуокиси серы проявляется в виде головных болей, бессонницы, раздражения слизистой оболочки, а в некоторых случаях – хронического бронхита и конъюнктивита. Твердые фазы окислов серы увеличивают концентрацию твердых частиц в ОГ и являются одним из основных компонентов, сокращающих срок службы нейтрализаторов.

Характер изменения концентрации кислорода  $\text{O}_2$  в отработавших газах противоположен характеру изменения CO. Большая концентрация кислорода  $\text{O}_2$  возникает при работе двигателя на обедненных, а большая концентрация CO – при работе на обогащенных смесях (рис. 1.11).

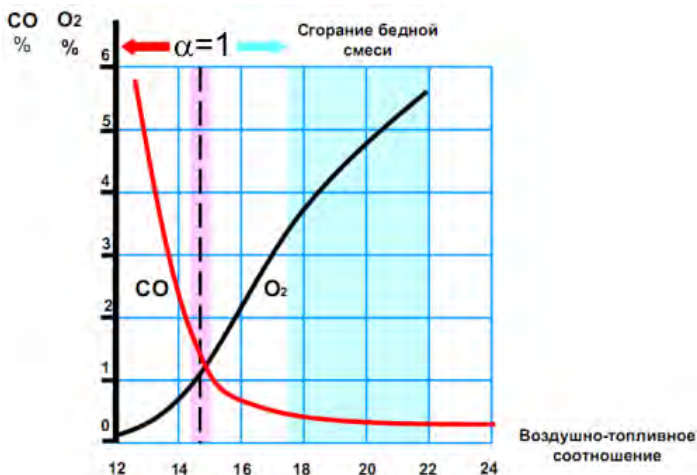


Рис. 1.11. Зависимость концентрации O<sub>2</sub> и CO в ОГ от состава смеси

Количество остаточного кислорода определяется в первую очередь типом рабочего процесса. В ДВС с принудительным воспламенением (бензиновые и газовые двигатели) состав топливовоздушной смеси близок к стехиометрическому ( $\alpha = 0,85-1,15$ ). В итоге концентрация кислорода в ОГ обычно не превышает 2,0–3,0 % (по объему).

В дизелях содержание O<sub>2</sub> в ОГ зависит от наличия наддува и режима работы. На режиме холостого хода концентрация кислорода достигает 18 % по объему (при исходной концентрации кислорода в воздухе 21 %), а на режимах полной нагрузки – от 5,0–7,0 % для ДВС со свободным впуском воздушного заряда и до 10,0–13,0 % – для двигателей с наддувом.

Наличие в ОГ продуктов износа деталей двигателя обусловлено износом трущихся пар «поршень–цилиндр», «коленчатый вал – вкладыши», «стержень клапана–направляющая втулка», пары шестерен и т. д. Продукты износа попадают в масло и вместе с ним по стенкам цилиндра – в КС. Их содержание в ОГ ДВС определяется в основном техническим состоянием двигателя. Повышенное попадание масла в КС связано либо с износом поршневых колец, либо с износом направляющих втулок впускных и выпускных клапанов.

## 1.6. Парниковые газы

Как было отмечено выше, кроме веществ, обладающих вредным воздействием, в ОГ присутствуют также безвредные продукты полного сгорания – диоксид углерода  $\text{CO}_2$  и вода  $\text{H}_2\text{O}$  (в виде паров). С конца 1980-х гг.  $\text{CO}_2$  привлек к себе большое внимание, поскольку согласно одной из гипотез этот газ ответствен за интенсификацию глобального потепления климата.

В 1992 г. в Рио-де-Жанейро (Бразилия) на заседании Международного комитета ООН по окружающей среде был принят текст Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК), в которой отмечалась тенденция изменения климата на Земле, заключающаяся в повышении средней глобальной температуры, что привело, в частности, к усилению засухи в южных районах и увеличению осадков в средних широтах. При этом глобальное потепление климата является следствием парникового эффекта.

*Парниковый эффект – явление вторичного нагрева атмосферы длинноволновым (инфракрасным) излучением от поверхности планеты, возвращаемым обратно к поверхности некоторыми газами, находящимися в атмосфере. Парниковый эффект определяется разностью между средней температурой поверхности планеты (плюс  $15^\circ\text{C}$ ) и ее радиационной температурой в космосе (минус  $18^\circ\text{C}$ ). Соответственно парниковый эффект равен плюс  $33^\circ\text{C}$ .*

Парниковый эффект обусловлен тем, что поверхность планеты нагревается под воздействием радиационного излучения Солнца: любое нагретое тело дает излучение в инфракрасном спектре, т. е. атмосфера дополнительно нагревается за счет инфракрасного излучения от поверхности планеты. Кроме того, инфракрасное излучение отражается от поверхности облаков и, возвращаясь к поверхности Земли, дополнительно нагревает планету. К парниковым газам относят диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ , гидрофторуглероды  $\text{HFC}$ , перфторуглероды  $\text{PFC}$  и гексафторид серы  $\text{SF}_4$ . Наибольшее влияние на создание парникового эффекта оказывает диоксид углерода, массовый выброс которого в атмосферу наибольший – 68 % от суммарного выброса всех парниковых газов. На долю  $\text{CH}_4$  приходится 21 %,  $\text{N}_2\text{O}$  – 10 %, на остальные – 1 % (табл. 1.4).

Таблица 1.4

## Краткая характеристика парниковых газов

Название, формула, обозначение	Парниковая активность (относительная)	Источник образования
Диоксид углерода $\text{CO}_2$	1	Горение твердых, жидких и газообразных веществ, в состав которых входит углерод
Метан $\text{CH}_4$	21	Процессы гниения, газодобыча, утечка через уплотнение в магистральных трубопроводах и газобаллонных установках автотранспорта
Закись азота $\text{N}_2\text{O}$	310	Производство азотных удобрений и азотной кислоты, отработавшие газы ДВС (особенно при наличии нейтрализатора)
Гидрофторуглероды $\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$ (HFC, ГФУ)	140–11700	Заменитель хлорфторуглеродов: упаковка, холодильное оборудование, огнетушители, чистящие средства, аэрозоли
Перфторуглероды $\text{CF}_4$ , $\text{C}_2\text{F}_6$ PFC (ПФУ)	6500–9200	Заменитель хлорфторсодержащих веществ; заменитель крови; используется при алюминиевом литье
Гексафторид серы $\text{SF}_6$	23900	Используется при изготовлении высоковольтных выключателей и магниевого литье

В 1997 г. (в Киото, Япония) на третьей конференции стран-участниц РКИК было принято дифференцированное решение по допустимому уровню выбросов  $\text{CO}_2$  каждой страной в результате антропогенной деятельности, т. е. были приняты нормы (квоты) выбросов. Этот документ известен как Киотский протокол. Цель данного документа – сократить вредное влияние человеческой деятельности на состояние окружающей среды, выражающееся в интенсификации глобального потепления.

Явление парникового эффекта позволяет поддерживать на поверхности Земли температуру, при которой возможно возникновение и развитие жизни. Если бы парниковый эффект отсутствовал, средняя температура поверхности земного шара была бы значительно ниже, чем сейчас. Однако при повышении концентрации парниковых газов увеличивается непроницаемость атмосферы для инфракрасных лучей, что приводит к повышению температуры Земли.

## **2. ОЦЕНКА СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

### **2.1. Основы сертификации**

Существуют организации, которым дано право проверять ДВС и АТС, принадлежащие другим организациям или физическим лицам: органы ГАИ, испытательные лаборатории (центры). Получение разрешения (лицензии) на проведение оценки определенного перечня показателей продукции возможно при условии аккредитации данной организации, т. е. подтверждения наличия в организации необходимого оборудования и его технического состояния, а также необходимого профессионального уровня специалистов.

*Лицензия* (от латинского *licentia* – свобода, право) – это документ, представляющий собой специальное разрешение на осуществление конкретного вида деятельности при обязательном соблюдении лицензионных требований и условий, выданный лицензирующим органом юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю.

Важнейшей целью лицензирования деятельности на автомобильном транспорте стало государственное воздействие на хозяйствующие субъекты для соблюдения ими требований безопасной эксплуатации принадлежащих им автотранспортных средств.

Вторая цель, являющаяся основой для разрешительной системы как средства государственного регулирования деятельности на транспорте, – это допуск на рынок транспортных услуг квалифицированных, надежных и финансово дееспособных производителей этих услуг.

Третья цель – регулирование рынка транспортных услуг за счет введения квот лицензий внутри сектора транспортного рынка или между его секторами.

Четвертая, не менее важная, цель – соблюдение экологических норм, установленных в области транспорта и дорожного хозяйства.

Деятельность по подтверждению соответствия продукции установленным требованиям называется *сертификацией* (обязательная и добровольная сертификация).

«Сертификация» в переводе с латыни означает «сделано верно». Для того чтобы убедиться в том, что продукт или услуга «сделаны верно», надо знать, каким требованиям они должны соответствовать и каким образом возможно получить достоверные доказательства этого соответствия. Общеизвестным способом такого доказательства служит сертификация соответствия. Установление соответствия заданным требованиям сопряжено с испытаниями или контролем. В оценке соответствия наиболее достоверными считаются результаты испытаний третьей стороной, т. е. лицом или органом, независимым от поставщика продукции или услуги (первая сторона), и потребителем (вторая сторона).

*Сертификация* – это процедура, посредством которой третья сторона письменно удостоверяет, что должным образом идентифицированная продукция, процесс, услуга соответствуют заданным требованиям.

*Орган по сертификации* – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, аккредитованные в установленном порядке для выполнения работ по сертификации.

*Сертификат соответствия* – документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договора.

Сертификация может быть обязательной или добровольной.

*Аккредитация* – это официальное признание органом по аккредитации компетентности физического или юридического лица выполнять работы в определенной области оценки соответствия, осуществляемое на основе следующих принципов:

- добровольности;
- открытости и доступности правил аккредитации;
- компетентности и независимости органов, осуществляющих аккредитацию;
- недопустимости ограничения конкуренции и создания препятствий пользованию услугами органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий;



– недопустимости совмещения полномочий на аккредитацию и подтверждение соответствия;

– недопустимости установления пределов действия документов об аккредитации на отдельных территориях.

Весь процесс сертификации механических транспортных средств может быть разбит на отдельные этапы, каждый из которых связан с проведением определенных видов деятельности по сертификации объектов, в качестве которых могут быть:

– агрегаты, узлы, детали (т. е. составные части), которые предназначены для установки на новый автомобиль;

– отдельные свойства транспортного средства (например, токсичность отработавших газов);

– механическое транспортное средство в целом (по совокупности свойств, привносимых в него агрегатами, узлами, деталями).

Сертификация механического транспортного средства в целом сопровождается выдачей документа «Одобрение типа транспортного средства», который подтверждает, что должным образом идентифицированное транспортное средство соответствует перечню технических требований, предъявляемых к данному типу транспортных средств. Технические требования, представляемые системой нормативной документации, зависят от категории транспортного средства.

## **2.2. Стандартизированные испытания**

Нормирование ОГ ДВС – одно из основных мероприятий снижения токсичности автомобильных выбросов, постоянно возрастающее количество которых оказывает угрожающее влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха крупных городов и соответственно – на здоровье человека.

Существуют разные типы стандартов: национальные (в Беларуси – СТБ), межгосударственные (ГОСТ) и международные, которыми пользуются в качестве национальных либо наряду с последними, а также местные (локальные).

Впервые нормирование токсичности ОГ было введено в США (штат Калифорния) в 1959 г., когда было установлено, что фотохимические реакции углеводородов и оксидов азота способны образовывать многие вторичные загрязнители. В связи с тем что основной вклад в общее загрязнение атмосферного воздуха углеводородами и оксидами

азота вносят ОГ ДВС, последние были признаны причиной фотохимического смога, а перед обществом появилась проблема законодательного ограничения вредных выбросов от транспорта с ДВС.

В связи с этим в конце 1950-х годов в Калифорнии была начата разработка стандартов на выброс вредных веществ, содержащихся в ОГ автомобилей. Целью стандарта было «установление максимально допустимых норм содержания загрязнителей в автомобильных выбросах, связанных с охраной здоровья населения, предотвращением раздражения органов чувств, ухудшением видимости и ущерба растительности». В 1959 г. в Калифорнии были установлены первые в мире стандарты – предельные значения в ОГ оксидов углерода и суммарных углеводородов. В 1965 г. в США принят закон о контроле за загрязнением воздуха автотранспортом (The Motor Vehicle Air Pollution Control Act), а в 1966 г. утвержден государственный стандарт США. Последний был, в сущности, техническим заданием для автомобильной промышленности, стимулируя разработку и внедрение передовых мероприятий, направленных на совершенствование автомобильной техники. Одновременно это позволяло Агентству по охране окружающей среды США (ЕПА) периодически ужесточать стандарты, снижая количественное содержание токсичных компонентов в ОГ.

Последовательно реализуемая комплексная государственная программа, в соответствии с которой законодательная работа по нормированию выбросов и контроль за ее реализацией для легковых автотранспортных средств проводятся в США с 1967 г., грузовых АТС и автобусов с бензиновыми двигателями – с 1969 г., грузовых АТС и автобусов с дизелями – с 1982 г., обусловило то, что, несмотря на значительный рост автопарка, массовый выброс вредных веществ от АТС США постоянно сокращается.

Немаловажная особенность регулирования вредных выбросов от дизельных двигателей в США состоит в том, что в штате Калифорния приняты свои, более строгие, ограничения эмиссии, поэтому любой штат может выбрать, следовать национальным стандартам Tier или стандартам штата Калифорния. Всеобъемлющий характер стандартов Tier проявляется даже в принятой классификации двигателей по мощности: 0–18 кВт, 19–55, 56–129, 130–560 и более 560 кВт. Для каждой группы установлены свои ограничения вредных выбросов.

Разработка первого стандарта на токсичность ОГ автомобилей в Японии относится к 1966 г. Сначала был принят стандарт на содер-

жание оксида углерода – 5 %, а в 1969 г. эта норма ужесточилась до 2,5 %. В 1972 г. Агентство по охране окружающей среды Японии, как и в США, установило стандарты на качество атмосферного воздуха для оксидов серы, оксида углерода и взвешенных частиц (углеводородов), позднее дополненных стандартами на свинец и оксиды азота. С этого времени нормирование вредных веществ в ОГ автомобилей переходит под государственный контроль.

В Европе вопросами совершенствования АТС занимаются транспортные организации Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН), Европейский союз (ЕС) и Международная организация по стандартизации (ISO). В Европе нормирование ОГ автомобилей разрабатывалось под влиянием автомобильных фирм Франции и ФРГ. В 1971 г. в Европе были приняты Правила ЕЭК ООН 15, которые включают нормы на выброс оксидов азота, суммарных углеводородов и оксидов азота в ОГ и методы испытаний автомобилей при определении токсичности ОГ. В дальнейшем был принят целый ряд новых Правил, которые распространялись на различные типы АТС и ужесточали требования к их токсичности.

В СССР первый государственный стандарт по ограничению вредных веществ в ОГ автомобилей с бензиновыми двигателями был принят в 1970 г. (ГОСТ 16533–70). В последующем были разработаны и действуют различные нормативные и технические документы, в том числе отраслевые, государственные и межгосударственные стандарты (ОСТ и ГОСТ), в которых отражено поэтапное снижение норм выброса вредных компонентов ОГ. С 1999 г. Россия перешла к прямому использованию Правил ЕЭК ООН.

Двигатели всех транспортных средств (легковые и большегрузные автомобили, а также внедорожная техника) в США попадают под действие стандартов Tier. В ЕС для транспортных средств действуют стандарты Euro, а для внедорожной техники, в том числе и дизельных генераторов, – Stage.

Существуют три основных ездовых цикла: американский, японский и европейский, различающиеся продолжительностью отдельных режимов в общем балансе времени работы автомобиля на динамометрическом стенде и методикой проведения анализа. Основное различие методик проведения сертификационных испытаний двигателей тяжелых грузовых автомобилей в США, Японии и ЕС заключается в выборе режимов работы двигателя, что обусловлено в первую очередь различны-

ми условиями эксплуатации автотранспортных средств на дорогах в этих регионах. Существенное различие сертификационных испытательных циклов двигателей, применяемых в ЕС, США и Японии, видно графиках на рис. 2.1–2.3. Для цикла FTP (США) наиболее характерны высокие частоты вращения коленчатого вала в диапазоне 70–90 % при средних и высоких нагрузках. Для японских циклов 13 mode и JE05 характерна область частот 40–60 % при средних и низких нагрузках, а также большое значение имеет холостой ход. Для европейских циклов ESC и ETC характерен расширенный диапазон частот от 45 до 80 % с акцентом на высокие нагрузки. При этом у них, в отличие от Японии, значимость холостого хода несколько меньше.

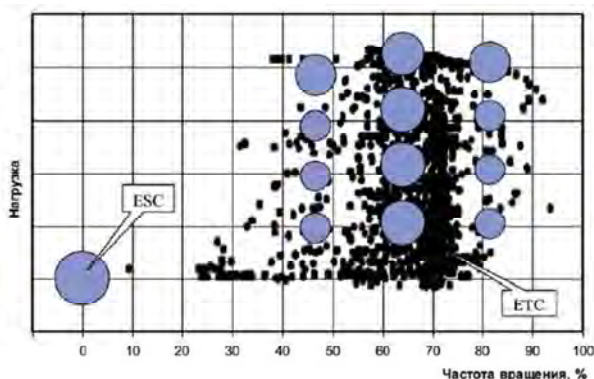


Рис. 2.1. Режимы работы двигателя по европейским испытательным циклам (ESC и ETC)

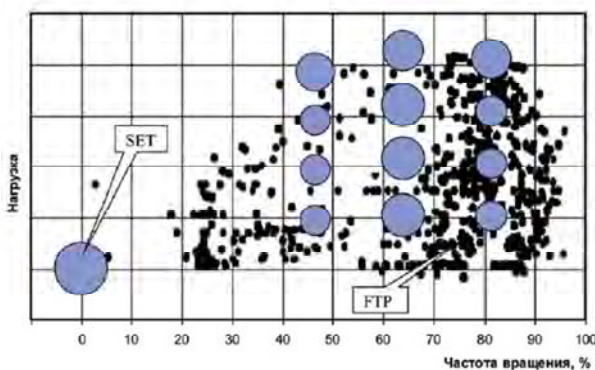


Рис. 2.2. Режимы работы двигателя по испытательным циклам США (SET и FTP)

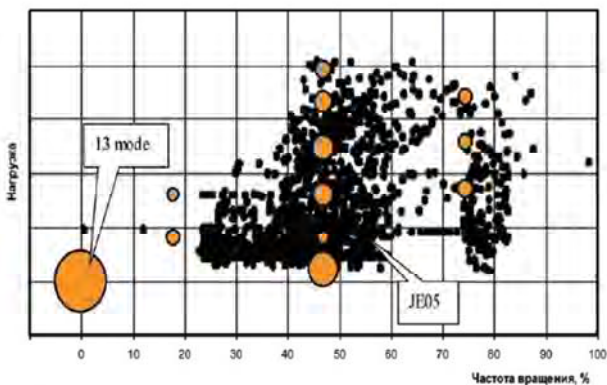


Рис. 2.3. Режимы работы двигателя по испытательным циклам Японии (13 mode и JE05)

Нормы на допустимые токсичные выбросы устанавливаются исходя из условия обеспечения санитарных норм на предельно допустимые концентрации токсичных веществ в атмосфере на улицах городов с интенсивным движением автомобильного транспорта. С ростом автомобильного парка вводятся все более жесткие нормы. Для выработки единого подхода к оценке экологической безопасности автомобилей и двигателей в 1958 г. в рамках Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций была подписана Женевская конвенция по безопасности транспортных средств, к которой в настоящее время присоединилось 40 государств – основные промышленно развитые страны, за исключением США. В рамках Комитета по внутреннему транспорту были введены так называемые Правила ЕЭК ООН, которые устанавливают нормы на выбросы токсичных веществ с ОГ и регламентируют процедуру испытаний. Кроме того, Венским соглашением 1997 г. устанавливаются единые требования к техническим осмотрам (техническому состоянию АТС в эксплуатации).

Для экологической оценки транспортные средства в зависимости от весового рейтинга и назначения условно разделены на две большие группы. К первой группе относятся легкие и средние автомобили (пассажирские и грузовые) полной массой до 3,5 т, у которых вредные выбросы с ОГ определяют при испытаниях автомобиля на динамометрическом стенде с беговыми барабанами.

Вторая группа охватывает тяжелые автомобили весом более 3,5 т, для которых вредные выбросы с ОГ определяют при испытаниях двигателя на моторном стенде. После 1992 г. стандарты Euro стали обязательными для всех стран-участниц ЕС и были введены новые типы приемочных испытаний. В ряде стран по инициативе глав государств новые стандарты появились раньше даты их официального внедрения. В отдельную группу выделены все внедорожные машины.

Основные требования к выбросам вредных веществ автомобилями и двигателями установлены в Правилах ЕЭК ООН № 49 (грузовые автомобили и автобусы), 83 (легковые автомобили и легкие грузовики) и 96 (дизели сельскохозяйственных и лесных тракторов, внедорожных транспортных средств). Указанные документы, действующие также и в Республике Беларусь, постоянно и оперативно пересматриваются, дополняются, модернизируются в рамках рабочей группы по загрязнению воздуха и экономии энергии КВТ ЕЭК ООН (ГДЗЭ) и принимают статус международных стандартов после их принятия Всемирным форумом WP29.

Другим, не менее важным направлением является разработка так называемых глобальных технических предписаний (ГТП), которые в будущем придут на смену региональным и национальным стандартам, в том числе правилам ЕЭК ООН и директивам ЕС. На настоящий момент в области экологии разработаны следующие ГТП:

- ГТП № 2 – процедура испытаний мотоциклов по определению выбросов вредных веществ, двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) и расхода топлива;
- ГТП № 4 – процедура испытаний по определению выбросов ВВ дизелями и газовыми двигателями для грузовых автомобилей;
- ГТП № 5 – требования к бортовой диагностике грузовых автомобилей и двигателей;
- ГТП № 10 – требования в отношении внецикловых выбросов;
- ГТП № 11 – требования к дизелям, устанавливаемым на сельскохозяйственных и лесных тракторах, а также внедорожной мобильной технике.

Новые ГТП и направления, находящиеся в стадии разработки:

- требования безопасности в отношении АТС, работающих на водороде и топливных элементах (HFCV–SGE);
- концепция экологически чистого транспортного средства (EFV, скорее всего, будет оформлена в виде специальной резолю-

ции или в рамках Сводной резолюции по конструкции транспортных средств);

- требования к рыночным моторным топливам (FQ, скорее всего, будут оформлены в виде рекомендаций правительствам договаривающихся сторон);

- всемирная процедура испытаний легковых автомобилей (WLTP);

- процедуры испытаний по определению выбросов вредных веществ и потребления энергии коммерческими ТС и автобусами с гибридными силовыми установками (HDH);

- процедура испытаний систем кондиционирования легковых автомобилей в отношении их энергетической эффективности и влияния на экологические показатели автомобилей (предполагается, что она будет включена в Правила № 83, 101 и, возможно, оформлена в виде отдельного ГТП (MACTR));

- требования к дополнительным системам снижения токсичности отработанных газов коммерческих автомобилей (REC).

Первые стандарты (Правила ЕЭК ООН) регламентировали требования к процедуре испытаний, приборам, оборудованию и устанавливали максимально возможные для своего времени ограничения на выбросы CO, CH и дымности ОГ. При их разработке учитывались конструктивные особенности автомобилей, наиболее важные условия эксплуатации, технологические возможности изготовителей транспортных средств и горючесмазочных материалов, стоимость реализации стандартов. Дальнейшее совершенствование экологических стандартов шло и продолжает идти в направлении расширения номенклатуры нормируемых вредных компонентов, снижения их предельно допустимого уровня, более полного учета условий реальной эксплуатации, улучшения методов испытаний и точности измерений, оптимизации характеристик топлив, используемых при испытаниях и эксплуатации, гармонизации стандартов, применяемых разными странами.

### **2.3. Европейская классификация автотранспорта**

В стандартах объекты испытаний подразделяются:

- по сфере их применения (мопеды, мотоциклы, автобусы, внедорожная техника и т. д.);

- предмету оценки (экологический уровень конструкции или техническое состояние).

Каждый стандарт оговаривает следующие основные положения:

1) область распространения, т. е. какие объекты попадают под действие данного документа. Согласно принятой ЕЭК ООН классификации, а также в соответствии с ГОСТ 31286 «Транспорт дорожный. Основные требования и определения. Классификация» транспортные средства делятся на шесть категорий (табл. 2.1);

2) комплектация, в которой проводят испытания, т. е. перечень агрегатов, которые обязательно должны быть в наличии. При невозможности установки некоторых агрегатов приводятся численные значения их характеристик, чтобы можно было имитировать наличие необходимых агрегатов;

3) режимы испытаний – сочетание нагрузки, частоты вращения и времени выдержки на каждом режиме;

4) методика расчета конечных значений экологических показателей объекта испытаний;

5) перечень и методы измерения экологических показателей, а также погрешность средств измерения;

б) нормативные (предельные) значения контролируемых параметров. В зависимости от методики испытаний нормативы могут выражаться:

– для АТС – массовыми выбросами (г/км, г/испытание);

– ДВС – концентрацией токсичных компонентов в сухих ОГ, оцениваемой в объемных процентах, %, миллионных долях по объему, млн<sup>-1</sup>, ppm, в миллиграммах на 1 л ОГ или удельным выбросом ВВ, г/(кВт·ч);

7) сроки действия документа и нормативных показателей.

Таблица 2.1

### Классификация АТС

Категория АТС	Тип и общее назначение АТС	Максимальная масса, т	Класс и эксплуатационное назначение АТС
1	2	3	4
L1	Механические АТС, имеющие менее 4 колес	В случае ДВС $iV_h < 50 \text{ см}^3$ ; в случае электродвигателя $N_e < 4 \text{ кВт}$	Двухколесные мопеды, максимальная конструктивная скорость которых не превышает 50 км/ч



Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4
L2	Механические АТС, имеющие менее 4 колес	В случае ДВС с принудительным зажиганием $iV_h < 50 \text{ см}^3$ ; в случае ДВС другого типа $N_e < 4 \text{ кВт}$ ; в случае электродвигателя $N_e < 4 \text{ кВт}$	Трехколесные мопеды с любым расположением колес, максимальная конструктивная скорость которых не превышает 50 км/ч
L3	Механические АТС, имеющие менее 4 колес	$iV_h > 50 \text{ см}^3$ и (или) максимальная скорость превышает 50 км/ч	Мотоциклы – двухколесные АТС
L4	Механические АТС, имеющие менее 4 колес	$iV_h > 50 \text{ см}^3$ и (или) максимальная скорость (при любом двигателе) превышает 50 км/ч	Мотоциклы с коляской – трехколесные АТС с колесами, асимметричными по отношению к средней продольной плоскости
L5	Механические АТС, имеющие менее 4 колес	$iV_h > 50 \text{ см}^3$ и (или) максимальная скорость (при любом двигателе) превышает 50 км/ч	Трициклы – трехколесные АТС с колесами, симметричными по отношению к средней продольной плоскости
L6	Четырехколесное транспортное средство	Масса АТС без аккумуляторов (АТС на электротяге) не превышает 350 кг; в случае ДВС с принудительным зажиганием $iV_h < 50 \text{ см}^3$ ; в случае ДВС другого типа $N_e < 4 \text{ кВт}$ ; в случае электродвигателя $N_e < 4 \text{ кВт}$	Легкий квадрицикл, максимальная конструктивная скорость не превышает 50 км/ч
L7	Четырехколесное транспортное средство иное, чем транспортное средство категории L6	Ненагруженная масса не превышает 400 кг (550 кг для транспортного средства, предназначенного для перевозки грузов) без учета массы аккумуляторов (в случае электрического транспортного средства); $N_e < 15 \text{ кВт}$	Квадрицикл

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4
M1	АТС, используемые для перевозки пассажиров и имеющие не более 8 мест (кроме места водителя)	Не регламентируется	Легковые автомобили, в том числе повышенной проходимости
M2	АТС, используемые для перевозки пассажиров и имеющие более 8 мест (кроме места водителя)	До 5,0	Автобусы: городские – кл. I, междугородные – кл. II, туристические – кл. III
M3	АТС, используемые для перевозки пассажиров и имеющие более 8 мест (кроме места водителя)	Свыше 5,0	Автобусы: городские – кл. I, междугородные – кл. II, туристические – кл. III, в том числе сочлененные
M2 и M3	Отдельно выделяются маломестные АТС, предназначенные для перевозки пассажиров, вместимостью не более 22 сидящих или стоящих пассажиров (кроме места водителя)	Не регламентируется	Автобусы маломестные: для стоящих и сидящих пассажиров – кл. А; для сидящих пассажиров, в том числе повышенной проходимости, – кл. В
N1	АТС, предназначенные для перевозки грузов	Классы, кг: I – < 1305 II – 1305–1760 III – 1760–3500	Грузовые, специализированные и специальные автомобили, в том числе повышенной проходимости
N2	АТС, предназначенные для перевозки грузов	Свыше 3,5 до 12,0	Грузовые автомобили, автомобили-тягачи, специализированные и специальные автомобили, в том числе повышенной проходимости

## Окончание табл. 2.1

1	2	3	4
N3	АТС, предназначенные для перевозки грузов	Свыше 12,0	Грузовые автомобили, автомобили-тягачи, специализированные и специальные автомобили, в том числе повышенной проходимости
O1	АТС, буксируемые для перевозки	До 0,75	Прицепы
O2	АТС, буксируемые для перевозки	Свыше 0,75 до 3,5	Прицепы и полуприцепы
O3	АТС, буксируемые для перевозки	Свыше 3,5 до 10,0	Прицепы и полуприцепы
O4	АТС, буксируемые для перевозки	Свыше 10,0	Прицепы и полуприцепы
G	АТС, предназначенные для перевозки пассажиров и грузов	–	Внедорожники. Этот символ применяется только в сочетании с M или N (например, N1G)
T	Механическое транспортное средство на колесном или гусеничном ходу, имеющее не менее 2 осей		Сельскохозяйственные и лесохозяйственные тракторы. Предназначены для буксировки, толкания, перевозки или приведения в действие определенных устройств, механизмов или прицепов. Могут быть приспособлены для перевозки грузов и обслуживающего персонала

Оценка содержания компонентов ВВ в ОГ в настоящее время проводится:

– по содержанию в ОГ газообразных ВВ – оксидов азота ( $\text{NO}_x$  в пересчете на диоксид азота  $\text{NO}_2$ ), оксида углерода  $\text{CO}$  и суммарных

углеводородов (обычно в пересчете на условный состав топлива  $C_1H_{1,85}$ , но может быть и в пересчете на углерод С или пропан  $C_3H_8$ );  
– по содержанию в ОГ дисперсных частиц (РМ);

– для дизелей помимо перечисленного дополнительно определяют дымность ОГ (на установившихся и переходных режимах).

Перед испытаниями по оценке экологических показателей проводят испытания ДВС (или АТС) с целью его идентификации с заявленными характеристиками (согласно ТУ) с необходимой комплектацией. Только при соответствии характеристик ДВС требованиям ТУ проводят испытания на токсичность. При этом применяют два способа: испытания ДВС в составе автомобиля на стенде с беговыми барабанами (рис. 2.4) и испытание ДВС на моторном стенде (рис. 2.5). Испытания ДВС на моторном стенде более предпочтительны (если иное не оговаривается в соответствующих стандартах), так как этот вид испытаний более точен и менее дорог.

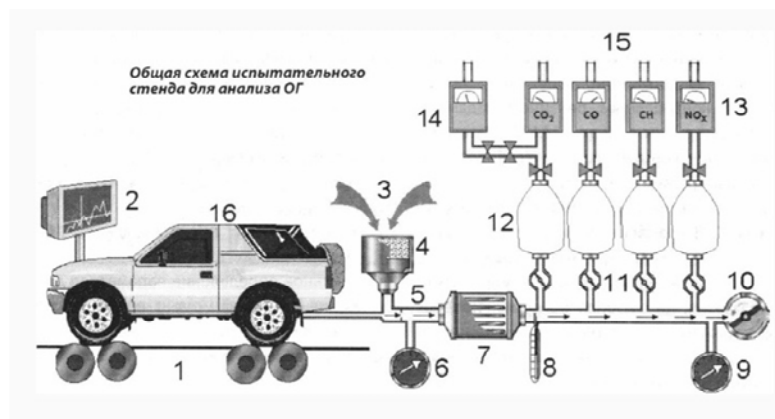


Рис. 2.4. Испытательный стенд с беговыми барабанами:

1 – беговые барабаны; 2 – индикация/управление циклом движения; 3 – подача наружного воздуха; 4 – фильтр наружного воздуха; 5 – канал разбавления воздуха; 6 – контроль давления; 7 – охладитель; 8 – контроль температуры ОГ; 9 – контроль давления ОГ; 10 – ротационный насос; 11 – вентиль для взятия проб ОГ; 12 – сборник ОГ; 13 – измерительные приборы для  $CO_2$ , CO, CH,  $NO_x$ ; 14 – сажевые фильтры для дизельных двигателей; 15 – выпуск ОГ; 16 – испытуемый автомобиль

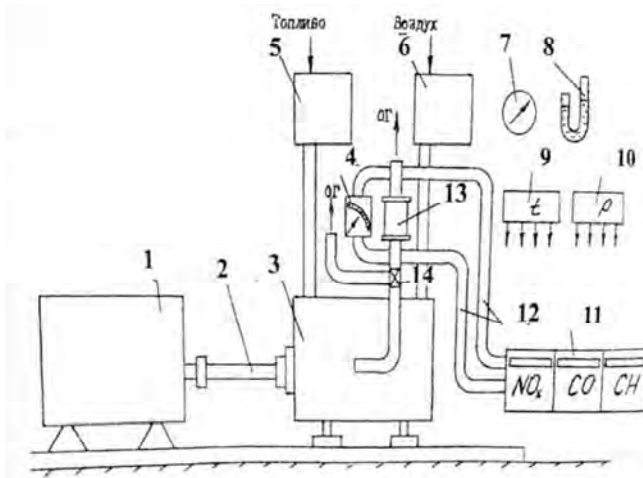


Рис. 2.5. Испытание ДВС на моторном стенде:

- 1 – тормозное устройство; 2 – карданный вал; 3 – двигатель внутреннего сгорания;  
 4 – дымомер; 5 – расходомер топлива; 6 – расходомер воздуха; 7 – барометр;  
 8 – психрометр; 9 – датчики измерения температур; 10 – датчики измерения давлений;  
 11 – газоанализатор; 12 – газоотборное устройство; 13 – нейтрализатор ОГ;  
 14 – электромагнитный клапан.

Испытания на беговых барабанах проводятся по ездовым циклам, имитирующим режимы работы ДВС в условиях реальной эксплуатации. Специальное оборудование, устанавливаемое на специальных АТС, рассматривают как эквивалент груза. Сочлененный автобус состоит из двух или более нераздельно скрепленных секций, в которых размещены пассажирские салоны, связанные между собой проходом для свободного перемещения пассажиров. Нераздельные секции постоянно скреплены друг с другом и могут быть разделены только с помощью специального оборудования, имеющегося только в специальных мастерских. Сочлененный автобус, состоящий из двух или более нераздельных, но сочлененных секций, рассматривают как одно транспортное средство.

Для седельных тягачей, предназначенных для буксирования полуприцепов, в качестве разрешенной максимальной массы рассматривают сумму массы тягача в снаряженном состоянии и массы, соответствующей максимальной статической вертикальной нагрузке, передаваемой тягачу от полуприцепа через седельно-сцепленное устрой-

ство, а также, в случае необходимости, максимальной массы груза тягача.

Для полуприцепов, сцепленных с тягачом, или прицепов с центральной осью в качестве разрешенной максимальной массы рассматривают массу, соответствующую максимальной статической вертикальной нагрузке на опорную поверхность от оси (-ей), когда полуприцеп или прицеп с центральной осью присоединен к тягачу и максимально загружен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
2. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
3. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие / А. Р. Кульчицкий. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2000. – 256 с.
4. Охрана природы. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта. Термины и определения: СТБ 17.0.1.01–2001.
5. Транспорт дорожный. Основные термины и определения. Классификация: ГОСТ 31286–2005.
6. Транспорт дорожный. Экологические классы: СТБ 1848–2009.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ .....	4
1.1. Оксид углерода .....	10
1.2. Углеводороды .....	13
1.3. Сажа .....	21
1.4. Оксиды азота.....	26
1.5. Попутные компоненты отработавших газов.....	32
1.6. Парниковые газы .....	36
2. ОЦЕНКА СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ .....	38
2.1. Основы сертификации .....	38
2.2. Стандартизованные испытания.....	40
2.3. Европейская классификация автотранспорта.....	46
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	53

Учебное издание

**АЛЬФЕРОВИЧ** Владимир Викентьевич

**ТОКСИЧНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-37 01 01  
«Двигатели внутреннего сгорания»  
дневной и заочной форм обучения

В 2 частях

Часть 1

**АНАЛИЗ СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

Редактор *Т. Н. Микулик*  
Компьютерная верстка *С. А. Маслера*

Подписано в печать 31.10.2016 Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,20. Уч.-изд. л. 2,50. Тираж 100. Заказ 572.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.