

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

А.Р. КУЛЬЧИЦКИЙ

**ТОКСИЧНОСТЬ ПОРШНЕВЫХ ДВС.
ОБРАЗОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВ**

Учебное пособие

Владимир 2010

УДК [621.43 + 662.6] (075.8)

ББК 31.365я73

К90

Рецензенты:

Зав. кафедрой теплотехники и тепловых двигателей
доктор технических наук, профессор
Российского университета дружбы народов
С.В. Гусаков

Доктор технических наук, профессор
кафедры теплотехники Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана
В.А. Марков

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Кульчицкий, А.Р.

К90 Токсичность поршневых ДВС. Образование вредных веществ при горении топлив : учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 80 с. – ISBN 978-5-9984-0018-6.

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

Предназначено для студентов специальности 140501 – двигатели внутреннего сгорания направления 140500 – энергомашиностроение (бакалавриат), а также специальностей 190601 – автомобили и автомобильное хозяйство, 330200 – инженерная защита окружающей среды (автотранспортный комплекс). Может быть полезно научным и техническим специалистам, занимающимся вопросами эксплуатации различных типов энергоустановок и транспорта.

Табл. 7. Ил. 29. Библиогр.: 42 назв.

УДК [621.43 + 662.6] (075.8)

ББК 31.365я73

ISBN 978-5-9984-0018-6

© Владимирский государственный университет, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Загрязнение природной среды продуктами деятельности человека является одной из глобальных проблем наряду, например, с проблемами изменения климата планеты, разрушения “озонового экрана” планеты, дефицитом пресной воды и энергоресурсов и т.п.

Двигатели внутреннего сгорания – одно из величайших изобретений человечества, без них было бы невозможно развитие цивилизации. Они используются как на транспортных средствах (автомобилях, тракторах и комбайнах, строительно-дорожной и коммунальной техники, самолетах, морских и речных судах, тепловозах), так и в стационарных установках (для привода воздушных компрессоров и водяных насосов, в составе генераторов по выработке электроэнергии, для привода различных механизмов). Но при работе двигателей происходит образование вредных веществ вследствие сгорания топлива и смазочного масла.

Все вышеизложенное является обоснованием необходимости изучения особенностей процессов образования вредных веществ в двигателях внутреннего сгорания с учетом характера режима работы объекта, на который устанавливается двигатель.

Все замечания и предложения по изложению материала просьба направлять автору на адрес электронной почты **ark6975@mail.ru**.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников образования вредных веществ является процесс горения топлива. Устройства, в которых реализуется процесс горения с целью получения механической энергии, называются *тепловыми машинами*, или двигателями. При этом они разделены на два класса: *с внешним подводом теплоты* (у которых продукты сгорания и рабочее тело разделены) и *внутреннего сгорания* (у которых продукты сгорания являются рабочим телом). К первым относятся, например, паровые котлы, двигатели Стирлинга; ко вторым – газотурбинные, поршневые и роторно-поршневые двигатели.

В настоящей книге рассмотрение проблемы образования вредных веществ ограничено поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ПДВС). Главным отличием подобных двигателей между собой является *тип топливовоздушной смеси*, предназначенной для сгорания, предварительно подготовленной или образующейся в ходе рабочего процесса. *Воспламенение* смеси может осуществляться различными способами: принудительно за счет подачи искры или от нагретой поверхности, а также вследствие самовоспламенения от сжатия. Характер воспламенения играет второстепенную роль, хотя также оказывает значительное влияние на протекание процесса горения.

Указанные ПДВС, кроме того, отличаются между собой по конструктивному исполнению камеры сгорания (неразделенные, полуразделенные и разделенные), агрегатному состоянию используемого топлива (жидкое и газообразное), составу топливовоздушной смеси (по соотношению окислитель – топливо), температуре и давлению подаваемого воздуха, давлению подаваемого топлива и т.д. Все это многообразие оказывает влияние на особенности протекания процесса горения и соответственно на процессы образования вредных веществ.

Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

*Естественный состав атмосферы ♦ Вредные вещества и их ПДК ♦ Антропогенный фактор ♦ Фоновая концентрация ♦ Дисперсность ♦ Парниковый эффект, парниковые газы и квоты на выброс ♦ Фотосинтез
♦ Устойчивое развитие*

§ 1. Состав атмосферы

Воздух – это механическая смесь газов, образующих газообразную оболочку Земли. Состав сухого воздуха (без паров воды) на уровне моря следующий (в процентах по объему) (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Состав сухого воздуха

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Азот	78,03	Неон	0,00123
Кислород	20,99	Гелий	0,0004
Аргон	0,94	Криптон	0,00005
Углекислый газ	0,03	Ксенон	0,000006
Водород	0,01		

Примечание. Плотность воздуха при 760 мм рт. ст. и 0 °С (на уровне моря на широте 45°) – 1,2928 кг/м³.

Естественный (природный) состав атмосферы определяется в первую очередь наличием в ней кислорода и азота. Присутствие в атмосфере других веществ обусловлено как *природными явлениями* (разрядами молний, пожарами, пылевыми бурями...), так и *антропогенными факторами* (выбросами от промышленных и сельскохозяйственных предприятий и транспортных средств) (рис. 1.1 [10]).

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

Содержание ВВ в воздухе гораздо меньше, чем азота и кислорода, но ввиду своей повышенной вредности именно они определяют уровень негативного воздействия на окружающую среду. Сочетание вредных химических соединений природного и антропогенного возникновения носит название *фоновой концентрации* загрязняющих веществ.

Фоновая концентрация загрязняющих веществ – это количество загрязняющих веществ, содержащихся в единице объема природной среды, подверженной антропогенному воздействию.

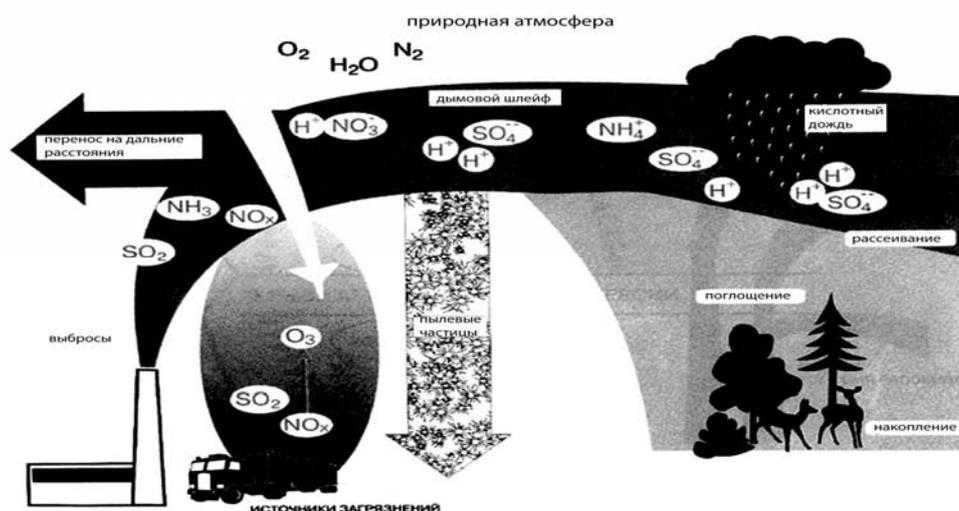


Рис. 1.1. Источники загрязнения природной среды и состав атмосферы

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

Отработавшие газы представляют собой *аэрозоль* – газовую среду, в которой взвешены твердые и жидкие частицы; распределение частиц в газовой среде характеризуется параметром “дисперсность”, в связи с чем их называют “дисперсными частицами”.

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

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

Состав отработавших газов тепловых двигателей – поршневых, газотурбинных – на 99,0...99,9 % состоит из продуктов полного сгорания (диоксида углерода и паров воды), а также из неиспользованных кислорода и азота воздуха. Но именно оставшаяся часть отработавших газов (не более 1 %) определяет *экологический уровень двигателей*.

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

Содержание тех или иных веществ в отработавших газах ДВС зависит как от типа используемого вида топлива, так и от типа организации и совершенства рабочего процесса двигателя. Поэтому обычно указывают достаточно широкие пределы содержания в ОГ различных компонентов.

§ 2. Состав отработавших газов

2.1. Содержание веществ в воздухе и отработавших газах

Содержание различных веществ (твердых, жидких и газообразных, как вредных, так и безвредных) в отработавших газах ДВС характеризуется следующими значениями (табл. 1.2).

Попадая в атмосферу, ОГ перемешиваются с воздухом, соответственно их концентрация в единице объема смеси воздуха и отработавших газов становится меньше, чем в чистых ОГ. Однако результирующее содержание ВВ в воздухе может колебаться в достаточно

широких пределах, поэтому и их влияние на окружающую среду, в том числе и на человека, различно.

Таблица 1.2

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

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

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

Существует понятие предельно-допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ. ПДК в воздухе населенных мест – это концентрации, которые при постоянном воздействии на человека в течение всей жизни не могут оказать вредного влияния на здоровье. При этом допускается максимальное разовое (мр) и средне-суточное (сс) содер-

жание ВВ в воздухе. Данные по некоторым веществам приведены в табл. 1.3 [4].

Таблица 1.3

Выборочные данные по ПДК вредных веществ в воздухе населенных мест

Вещество	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}
Азота диоксид	0,085	0,04
Аммиак	0,2	0,04
Бензин нефтяной (в пересчете на углерод)	5,0	1,5
Карбамид (мочевина)	-	0,2
Метанол	1,0	0,5
Озон	0,16	0,03
Углерода диоксид	5,0	3,0
Сажа	0,15	0,05
Серы диоксид	0,5	0,05
Формальдегид	0,035	0,003
Этанол	5,0	5,0

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}... ПДК_{n}}) не должна превышать единицы:}}

$$(K_1/\text{ПДК}_1) + (K_2/\text{ПДК}_2) + \dots + (K_n/\text{ПДК}_n) \leq 1.$$

2.2. Характер воздействия вредных веществ на человека

Воздействие вредных веществ на человека определяется уровнем концентрации вещества в атмосфере, степенью токсичности вещества, а также продолжительностью воздействия (табл. П1 [5]).

Оксиды азота NO_x. В отработавших газах ДВС присутствуют несколько различных соединений азота с кислородом, но в основном это оксид азота NO. В ОГ дизелей на долю NO приходится 95...98 % из всех оксидов, а в двигателях с принудительным воспламенением – 98,0...99,5 %.

Остальное (от 2 до 5 %) – диоксид азота NO_2 . При понижении температуры ОГ, попадающих в атмосферу, NO окисляется до NO_2 . В диапазоне температур 135...21 °С NO_2 находится в смеси с N_2O_4 , а при температуре ниже 21 °С полностью переходит в N_2O_4 . NO – бесцветный газ, плохо растворим в воде; NO_2 – бурый газ с удушливым запахом, реагирует с водой с образованием азотистой HNO_2 и азотной HNO_3 кислот, которые разрушают легочную ткань, вызывая хронические заболевания, необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе. В соединении с углеводородами оксиды азота образуют токсичные нитроолефины, вызывающие заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, нервные расстройства.

Постоянное воздействие ВВ на человека, животных и растения может привести к мутациям на генетическом уровне и к резкому наследственному изменению организмов, меняющему их *морфологические* (внешнее и внутреннее строение) и/или *физиолого-поведенческие признаки*.

Оксид углерода CO – 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 крови кислород, поскольку обладает в 200 раз большей растворимостью; в результате снижения содержания кислорода возникает удушье. При небольших концентрациях CO в воздухе проявляются головокружение и тошнота. Поскольку оксид углерода практически имеет ту же плотность, что и воздух (28 против 28,7 г/моль), то самостоятельно улетучивается из помещений очень плохо.

Углеводороды C_nH_m – самая многочисленная группа соединений, оказывают общетоксическое и раздражающее воздействие, способны вызывать многие хронические заболевания, часть углеводородов обладает неприятным запахом. Некоторые из представителей этого класса, например бенз(α)пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, обладают канцерогенным действием, т.е. способствуют развитию онкологических заболеваний.

Альдегиды RCHO (R – углеводородный радикал); характерный представитель – формальдегид HCHO . Обладают резким запахом; при определенных дозах вызывают раздражение дыхательных путей и слизистых оболочек носа и глаз. Действие на организм человека характеризуется раздражающим и общетоксическим эффектом на центральную нервную систему, поражением внутренних органов.

Соединения серы SO_2 и SO_3 хорошо растворимы в воде; обладают резким запахом, вызывают раздражение верхних дыхательных путей и нарушение белкового обмена в организме. В ОГ также присутствуют пары серной кислоты H_2SO_4 .

Оксид свинца PbO – вещество, которое обладает способностью накапливаться в организме; негативно воздействует на умственные способности, а также внутренние органы, вызывая в них мутагенные изменения.

Сажа С представляет собой мельчайшие частицы углерода – от долей до десятков микрон; самые мелкие способны по несколько суток витать в воздухе, попадая в легкие человека и вызывая раздражения и заболевания. Сажа, содержащаяся в ОГ ДВС (в отличие от сухой промышленной сажи), несет на себе частицы несгоревших углеводородов топлива и масла, что усиливает ее вредное воздействие.

Дисперсные частицы (PM – Particle Matter) – совокупное определение всех твердых и жидких (кроме воды) веществ, находящихся в воздухе, которые (в отличие от газообразных веществ) имеют геометрический размер, характеризующийся таким параметром, как *аэродинамический диаметр (АД)*.

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

Образование этих частиц обуславливается, с одной стороны, естественными факторами (пыль, споры и пыльца растений и т.д., поднимаемые в воздух ветром), а с другой – антропогенными (функционированием транспортных средств, станций по выработке электроэнергии и тепла, предприятий по выпуску цемента, добыче железной руды в открытых карьерах и т.п.). К числу антропогенных факторов относятся и процессы горения в различных устройствах, в том числе – сгорание топлива и смазочного масла в камере сгорания тепловых двигателей.

Частицы оказывают вредное влияние на человека вследствие попадания в легкие (рис. 1.2 [10]).

При этом частицы с АД более 10 мкм практически полностью задерживаются в ротовой и носовой полостях вследствие столкно-

вения с препятствиями. Частицы с АД не более 0,5 мкм полностью выдыхаются. Соответственно наибольший вред наносят частицы с АД = 0,5...10,0 мкм.

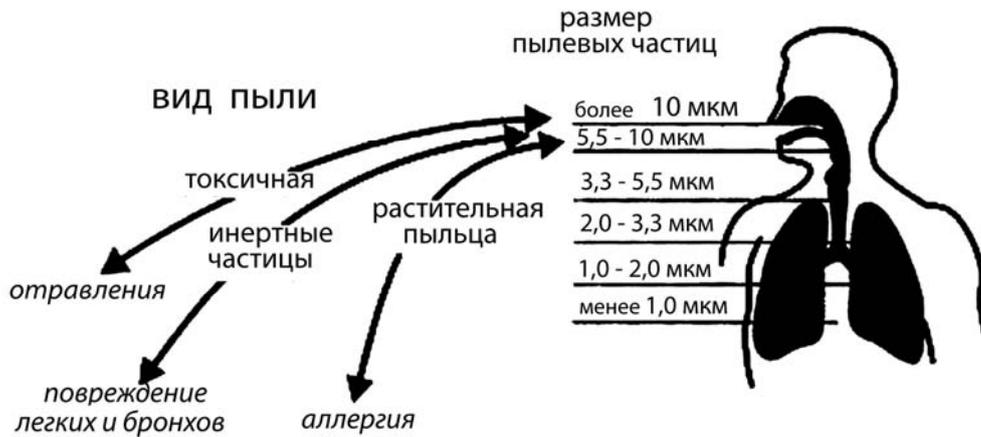


Рис. 1.2. Характер воздействия дисперсных частиц на человека

В двигателестроении под дисперсными частицами понимают все твердые и жидкие (кроме воды) вещества, находящиеся в смеси отработавших газов и воздуха при температуре смеси не более 52 °С.

Размер PM изменяется от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Дисперсные частицы, имеющие аэродинамический диаметр не более 2,5 μm , обозначают $PM_{2,5}$; частицы размером 2,5...10 μm – PM_{10} . Дисперсные частицы, выбрасываемые с ОГ автомобильного транспорта, обуславливают содержание в воздухе населенных мест до 10...17 % от всех PM_{10} , источником которых является антропогенная деятельность. В случае отсутствия крупной промышленности в городах эта цифра может достигать 75 %. Но источником дисперсных частиц могут быть и природные факторы: пыль и пыльца растений, и они также наносят вред человеку.

Большинство загрязняющих веществ представляют собой простые химические соединения. Однако дисперсные частицы, выбрасываемые с ОГ ДВС, отличаются широким химическим составом и различными физическими характеристиками. В их число входят твердые и жидкие вещества, представляющие собой продукты неполного сгорания топлива и смазочного масла, а также продукты износа деталей двигателя.

§ 3. Парниковые газы

3.1. Парниковый эффект

Кроме веществ, обладающих вредным воздействием, в ОГ присутствуют также безвредные *продукты полного сгорания* – диоксид углерода CO_2 и вода H_2O (в виде паров). С конца 1980-х гг. CO_2 привлек к себе большое внимание, поскольку согласно одной из гипотез этот газ ответственен за интенсификацию *глобального потепления климата*.

В 1992 г. в г. Рио-де-Жанейро (Бразилия) на заседании Международного комитета ООН по окружающей среде был принят текст *Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК)*, в которой была отмечена 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* [17].

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°C) и ее радиационной температурой в космосе (минус 18°C). Соответственно парниковый эффект равен плюс 33°C .

При усилении парникового эффекта температура поверхности растет при сохранении постоянной радиационной температуры. Обусловлен же парниковый эффект 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, дополнительно нагревает планету.

Данный эффект вызывается наличием в атмосфере ряда газов, которые получили название *парниковых газов* (ПГ).

Парниковые газы: диоксид углерода CO_2 , метан CH_4 , закись азота N_2O , гидрофторуглероды HFC , перфторуглероды PFC и гексафторид серы SF_4 .

Несмотря на наименьшую парниковую активность, наибольшее влияние на создание парникового эффекта оказывает диоксид углерода, массовый выброс которого в атмосферу наибольший – 68 % от суммарного выброса всех ПГ; при этом за период с 1950 по 1990 гг. концентрация CO_2 в атмосфере выросла с 280 ppm до 360 ppm, а к концу XXI века может достичь до 490...1260 ppm [2]. На долю CH_4 приходится 21 %, N_2O – 10 %, на остальные – 1 % (табл. 1.4 [11, 41]).

Таблица 1.4

Краткая характеристика парниковых газов

Название, формула, обозначение	Парниковая активность (относительная)	Источник образования
Диоксид углерода CO_2	1	Горение твердых, жидких и газообразных веществ, в состав которых входит углерод
Метан CH_4	21	Процессы гниения, газодобыча, утечка через уплотнения в магистральных трубопроводах и газобаллонных установках автотранспорта
Закись азота N_2O	310	Производство азотных удобрений и азотной кислоты, отработавшие газы ДВС (особенно при наличии нейтрализаторов)
Гидрофторуглероды $C_xH_yF_z$ (HFC, ГФУ)	140...11700	Заменитель хлорфторуглеродов: упаковка, холодильное оборудование, огнетушители, чистящие вещества, аэрозоли; производство самих
Перфторуглероды CF_4, C_2F_6 PFC (ПФУ)	6500...9200	Заменитель хлорфторсодержащих веществ; заменитель крови; используются при алюминиевом литье
Гексафторид серы SF_6	23900	Используется при изготовлении высоковольтных выключателей и при магниевом литье

Водяные пары (так же как и CO₂ являющиеся продуктом сгорания топлива вследствие наличия в топливе водорода) не отнесены к парниковым газам, хотя они обладают более сильным по сравнению с CO₂ свойством поглощать инфракрасное излучение.

3.2. Киотский протокол

В 1997 г. (в г. Киото, Япония) на третьей конференции стран-участниц РКИК было принято дифференцированное решение по допустимому уровню выбросов CO₂ каждой страной в результате антропогенной деятельности, т.е. были приняты нормы (квоты) выбросов. Этот документ известен как Киотский протокол [33]. Цель данного документа – сократить вредное влияние человеческой деятельности на состояние окружающей среды, выражающееся в интенсификации глобального потепления.

В этом протоколе расписаны механизмы достижения цели:

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

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

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

Наиболее часто в документах, касающихся механизмов реализации РКИК, приводятся данные по удельному значению *квотируемого выброса* углекислого газа в расчете на один доллар США (\$1) стоимости внутреннего валового продукта (ВВП). Но поскольку при этом не принимается во внимание соотношение уровней вы-

броса и поглощения CO_2 для каждой страны отдельно, то в этом случае в выигрыше страны с развитой экономикой, остальные страны отличаются наихудшими показателями (табл. П2 [13]). Но если расчет вести на основе содержания CO_2 в единице объема атмосферы, то результаты будут иные.

Так как квоты назначались отдельно для каждой страны, то, естественно, речь должна идти об объеме атмосферы, пропорциональной площади каждого государства (нет оснований считать, что высота атмосферы, принимаемая для расчета, для разных стран должна быть различна). При таком подходе (кг CO_2 /кв.км) одни из самых низких показателей – у России – 140, Канады – 45 и Австралии – 38. Кроме того, учитывая, что, например, в России 46 % территории занимают леса (1 га которых поглощает до 10 т углекислого газа в год), квота для России (2,389 млн т/год) с лихвой перекрывается поглощением (7,854 млн т/год). Существенный положительный баланс между квотой и поглощением лесами есть также у Канады и Австралии; небольшой плюс – у Швеции и Финляндии. Остальные же страны будут выбрасывать CO_2 в атмосферу (согласно квоте на промышленные выбросы) больше, чем способны поглотить зеленые насаждения этих стран. Например, в Нидерландах растительный мир способен ежегодно поглощать только 2 % от разрешенной квоты выбросов углекислого газа, в Великобритании – 4 %, Бельгии – 5 %, ФРГ – 11 %, Японии и Польше – по 21 %, во Франции – 40 % и т.д. (табл. П2). Таким образом, непоглощенные выбросы CO_2 вследствие перемещения воздушных масс будут попадать в соседние страны, т.е. одни страны перекладывают свои проблемы на других. Вряд ли подобное состояние проблемы борьбы с загрязнением окружающей среды может способствовать устойчивому развитию мира.

Устойчивое развитие – это развитие, отвечающее нуждам и ожиданиям настоящего поколения и не подвергающее риску способность будущих поколений удовлетворять их собственные нужды.

Однако существуют и другие гипотезы, объясняющие причины глобального потепления, тем более, что изменения климата в ис-

тории Земли (сильные потепления, засухи, оледенения, потопа) происходили неоднократно, в том числе и до появления человека. Что касается изменения концентрации CO_2 в атмосфере Земли на протяжении миллионов лет, то это следствие изменения температуры планеты, а не причина. При этом надо учесть, что порядка 90 % углекислого газа растворено в мировом океане. И именно температура океана оказывает основное влияние на концентрацию CO_2 в атмосфере: при нагревании воды растворимость газов уменьшается, и газы выделяются в воздух; при охлаждении воды, наоборот, CO_2 поглощается водой. Соответственно никакого отношения к антропогенной деятельности указанный процесс не имеет.

Изменение же концентрации углекислого газа в атмосфере носит, в первую очередь, сезонный характер – температурные колебания в период “зима – лето” также не имеют связи с деятельностью человека, а зависят от космических процессов: движение Земли по орбите вокруг Солнца, вращение Земли вокруг своей оси, наклон Земной оси, движение всей Солнечной системы в космосе, Солнечная активность, космические пылевые облака... Также большое влияние оказывают лесные пожары и особенно извержение вулканов, что не принималось во внимание при назначении квот.

Кроме того, само понятие “парниковый эффект” в отношении нижнего слоя атмосферы – тропосферы (до 12 км высоты) малоприменимо, поскольку подразумевает нагрев воздуха вследствие радиации (излучения). Однако для условий давлений свыше 0,02 МПа теплообмен осуществляется в основном за счет конвективного переноса тепла воздушными потоками; радиационный нагрев характерен для разреженных слоев атмосферы – стратосферы, мезосферы...

В результате насыщение атмосферы углекислым газом, несмотря на поглощение им теплового излучения, всегда приводит только к понижению и парникового эффекта, и средней поверхностной температуры планеты. Также стоит обратить внимание на то, что теплоемкость CO_2 меньше теплоемкости азота и кислорода, что при одинаковом теплоподводе обеспечивает более высокую температуру атмосферы с большей концентрацией CO_2 . Поэтому чем больше углекислого газа в воздухе, тем выше его температура, и

тем более интенсивными будут восходящие потоки воздуха, приводя к ускоренному отводу тепла от поверхности почвы. При этом с потоками воздуха от почвы будет отводиться влага, которая на больших высотах вследствие понижения температуры и последующей конденсации приведет к образованию облаков. Чем больше поверхность и масса облаков, тем меньше солнечной радиации будет достигать поверхности Земли и тем меньше будет нагрев почвы и воды. То есть снизится температура приземных слоев атмосферы.

Кроме того, стоит обратить внимание на данные за 1934 г. [18], согласно которым содержание CO_2 в атмосфере колеблется от 250 до 350 ppm. При этом над сушей ночью концентрация диоксида углерода на 20...30 ppm больше, чем днем (над морем такой разницы не наблюдается), а в воздухе населенных мест по сравнению с ненаселенными местностями концентрация CO_2 выше, но не более чем на 20...30 ppm. Влияние процессов горения и гниения повышает концентрацию CO_2 только в непосредственной близости от этих мест; только вулканическая деятельность сказывается на больших расстояниях. Дождь не изменяет содержания CO_2 в воздухе, но туман и иней, а также мороз (до -10°C) приводят к повышению его концентрации вследствие замедления перемешивания нижних слоев с верхними.

Эти данные приведены задолго до возникновения понятия “глобальное потепление” и в то время, когда автомобилей было гораздо меньше. Но цифры, приведенные более чем через 50 лет в Киотском протоколе (см. выше), и которые должны характеризовать негативные последствия развития промышленности, странным образом полностью совпадают с этими значениями...

Что касается самого факта увеличения концентрации CO_2 в атмосфере, то это даст скорее положительный эффект, чем отрицательный, поскольку будет способствовать повышению продуктивности сельского хозяйства и более эффективному восстановлению растительной массы в районах сведения лесов. Человек же может способствовать этому положительному процессу путем сохранения лесных массивов, парков и любых зеленых зон в населенных пунктах. В этом случае выделяющийся углекислый газ будет пол-

ностью поглощаться растительностью вследствие реакции фотосинтеза.

Фотосинтез – превращение зелеными растениями и фотосинтезирующими микроорганизмами лучистой энергии Солнца в энергию химических связей органических веществ:



В процессе фотосинтеза, происходящего с участием поглощающих свет пигментов (хлорофилла и других), растения синтезируют углеводы (другое название – сахарá; общая формула $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$) из неорганических соединений – CO_2 и H_2O .

На долю углеводов приходится около 80 % сухого вещества растений и около 20 % животных.

Ежегодно в результате фотосинтеза на Земле образуется порядка 150 млрд т органического вещества, усваивается около 300 млрд т CO_2 и выделяется почти 200 млрд т свободного O_2 . При этом вклад человечества в образование CO_2 составляет ежегодно не более 10 млрд т. Благодаря фотосинтетической деятельности *зеленых организмов* в первичной атмосфере Земли появился кислород, возник озоновый экран атмосферы и создались условия для биологической эволюции.

Вместе с тем в результате процессов гниения, дыхания и горения вновь образуются неорганические вещества и выделяется теплота:



Контрольные вопросы

1. Состав атмосферы.
2. Что такое антропогенный фактор?
3. Какие вещества считаются вредными?
4. Что означает термин “фоновая концентрация вещества”?
5. Источники поступления вредных веществ в атмосферу.
6. Что такое “аэрозоль”?
7. Что означает термин “дисперсность”?

8. Состав отработавших газов ДВС с принудительным воспламенением и дизелей.
9. Каким образом характеризуется экологический уровень ДВС?
10. Характер воздействия вредных веществ на человека.
11. Предельно-допустимая концентрация вредных веществ.
12. Вредные вещества однонаправленного и разнонаправленного действия.
13. Определение термина “аэродинамический диаметр”.
14. Что подразумевается под термином “дисперсные частицы в двигателестроении”?
15. Типы и источники образования дисперсных частиц.
16. Что относят к парниковым газам и каковы источники их образования?
17. Парниковый эффект.
18. Киотский протокол: цель и механизмы реализации.
19. Рамочная конвенция по изменению климата.
20. Квоты на выброс парниковых газов: принципы расчета.
21. Что означает термин “устойчивое развитие”?
22. Глобальное потепление: гипотезы данного явления.
23. Фотосинтез: понятие и протекание процесса.

Глава 2. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВ В ПОРШНЕВЫХ ДВС

Применение и параметры процессов горения ♦ Пределы воспламеняемости топлив ♦ Смеси стехиометрические, переобедненные и переобогащенные ♦ Смесеобразование внешнее и внутреннее ♦ Предварительно перемешанные и неперемешанные топливо и окислитель ♦ Кинетическое и диффузионное горение ♦ Виды воспламенения топливовоздушных смесей ♦ Свечи зажигания и свечи накаливания ♦ Изостехиометрическая поверхность ♦ Состав топлива, смазочного масла и продуктов сгорания

§ 1. Проблемы совершенствования экологических показателей процессов горения

Процессы горения различных видов топлив (твердых, жидких, газообразных) распространены достаточно широко: 1) в промышленном производстве при выплавке металлов, сжигании отходов, изготовлении стекла; 2) в котельных и на ТЭЦ при выработке тепла и электроэнергии; 3) в тепловых двигателях, используемых на автомобилях, судах, железнодорожном и авиационном транспорте, а также в качестве стационарных установок и т.д.

В результате реализации процессов горения происходит образование не только нетоксичных *продуктов полного сгорания*: диоксида углерода и паров воды, но и вредных веществ: *продуктов неполного сгорания*: оксида углерода, различных углеводородов C_nH_m и частиц сажи С; *продуктов окисления азота*, содержащегося как в топливе, так и в воздухе (окислителе), оксидов *серы*_x, содержащейся в нефтяных топливах, оксида *свинца*, содержащегося в бензинах в составе антидетонационной присадки – тетраэтилсвинца $Pb(C_2H_5)_4$.

Широкое распространение процессов горения обуславливает значительный выброс в атмосферу вредных веществ, приводя к загрязнению окружающей среды за счет антропогенных факторов (т.е. обусловленных деятельностью человека), которые в ряде случаев оказывают более вредное воздействие, чем естественные источники аналогичных веществ. А если учесть, что некоторые производства и подавляющее большинство транспортных средств эксплуатируются в населенных пунктах – местах сосредоточения боль-

шого количества людей, – то вред, наносимый антропогенными источниками ВВ, значительно превышает отрицательное воздействие на природу естественного (фоновое) уровня этих веществ.

Процессы горения, реализуемые в различных видах устройств, отличаются по следующим характеристикам:

- 1) виду используемого топлива (твердое, жидкое, газообразное);
- 2) химическому составу топлива;
- 3) способу обеспечения контакта топлива с окислителем относительно зоны горения (предварительное перемешивание или с раздельной подачей);
- 4) соотношению состояний топлива и окислителя: однофазное (оба находятся в газообразном состоянии) или двухфазное (топливо – в жидком или твердом состоянии, а окислитель – в газообразном или жидком);
- 5) соотношению количества реагирующего топлива и окислителя (стехиометрическое или избыточное по одному из компонентов);
- 6) времени, отводимому на сжигание единицы массы топлива;
- 7) способу воспламенения топлива (принудительное или за счет самовоспламенения);
- 8) способу поддержания режима горения (постоянное или периодическое);
- 9) способу отвода продуктов сгорания из зоны горения (постоянно в ходе процесса горения – в газотурбинных двигателях или периодически после завершения указанного процесса – в поршневых ДВС).

Перечисление даже этих девяти признаков указывает на неоднозначность способов организации процессов сжигания топлив, в том числе и на многообразие подходов по обеспечению высоких экологических показателей этих процессов.

§ 2. Условия воспламенения

Топливо – это энергоноситель. Для выделения потенциальной (химической) энергии, заключенной в топливе, необходимо его взаимодействие с окислителем, что обеспечит протекание реакции го-

рения (окисления). Такая реакция возможна при соблюдении трех основных условий.

1. Топливо и окислитель должны быть в газообразном состоянии.

Окислитель – это обычно воздух, иногда – чистый кислород.

В исходном состоянии топливо может быть твердым, жидким или газообразным. Переход топлива из твердого состояния в газообразное минуя жидкое (*возгонка*), а также переход из жидкого состояния в газообразное (*испарение*) требует предварительных затрат энергии для повышения температуры топлива до соответствующего уровня.

2. Воспламенение смеси топлива с окислителем возможно только при температуре, не ниже определенного уровня.

Температура воспламенения, например, метано-воздушной смеси 600...700 °С, смеси паров бензина с воздухом – порядка 450 °С, смеси дизельного топлива и воздуха – 220...250 °С. Необходимая энергия привносится извне: электрической искрой, открытым пламенем, накаленной поверхностью или за счет сжатия.

3. Воспламенение смеси топлива с окислителем возможно только при их определенном соотношении.

Газообразная смесь топлива с окислителем характеризуется *нижним и верхним пределами воспламеняемости*, т.е. наименьшей и наибольшей концентрациями топлива в смеси, при которых возможно воспламенение. Указанные пределы характеризуются либо содержанием топлива в смеси (в процентах по объему), либо коэффициентом избытка окислителя α относительно *стехиометрического соотношения* (при котором $\alpha = 1$). Максимальное значение α_{\max} соответствует максимально возможному содержанию окислителя в смеси, т.е. минимальному содержанию топлива, и характеризует *нижний предел воспламенения смеси*. Минимальное значение α_{\min} соответствует минимально возможному содержанию окислителя в смеси, т.е. максимальному содержанию топлива, и харак-

теризует *верхний предел воспламенения смеси*. Для сложных газов значения α_{\max} и α_{\min} зависят от их конкретного состава.

Если в смеси окислителя больше, чем соответствует α_{\max} , то смесь называется *переобедненной*, и она не может воспламениться из-за недостаточного тепловыделения. Если в смеси топлива больше, чем соответствует α_{\min} , то смесь называется *переобогащенной*, и она не может воспламениться из-за больших теплопотерь. Таким образом, переобедненная и переобогащенная смеси находятся за пределами воспламенения.

Все три необходимых условия реализуются в ДВС за счет согласования настроек систем газообмена и топливоподачи, а в двигателях с принудительным воспламенением (дополнительно) – своевременности подачи искры зажигания.

§ 3. Особенности горения топлив в поршневых ДВС

Особенности процесса горения топлива в поршневых ДВС определяются, во-первых, типом смесеобразования, а во-вторых, способом воспламенения топливо-воздушной смеси.

3.1. Тип смесеобразования

Смесеобразование обуславливается способом обеспечения контакта между топливом и окислителем: либо они подаются в цилиндр двигателя уже перемешанными, либо смесеобразование идет непосредственно в цилиндре двигателя наряду с другими, параллельно протекающими процессами. Соответственно речь идет либо о горении *предварительно перемешанных реагентов*, либо *предварительно неперемешанных*. В первом случае – это внешнее смесеобразование, во втором – внутреннее смесеобразование.

В ДВС с внешним смесеобразованием топливо начинает смешиваться с окислителем во впускном трубопроводе, а завершается в цилиндре двигателя в течение процесса впуска и сжатия. При внутреннем смесеобразовании в *дизелях с неразделенными камерами сгорания* (КС) топливо впрыскивается непосредственно в цилиндр (рис. 2.1 и 2.2).

При этом возможно развитие процессов смесеобразования как в объеме (*объемное смесеобразование*), так и частично в объеме и частично при испарении со стенок КС (*объемно-пленочное смесеобразование*), а также преимущественно за счет испарения со стенок КС (*пленочное смесеобразование*).

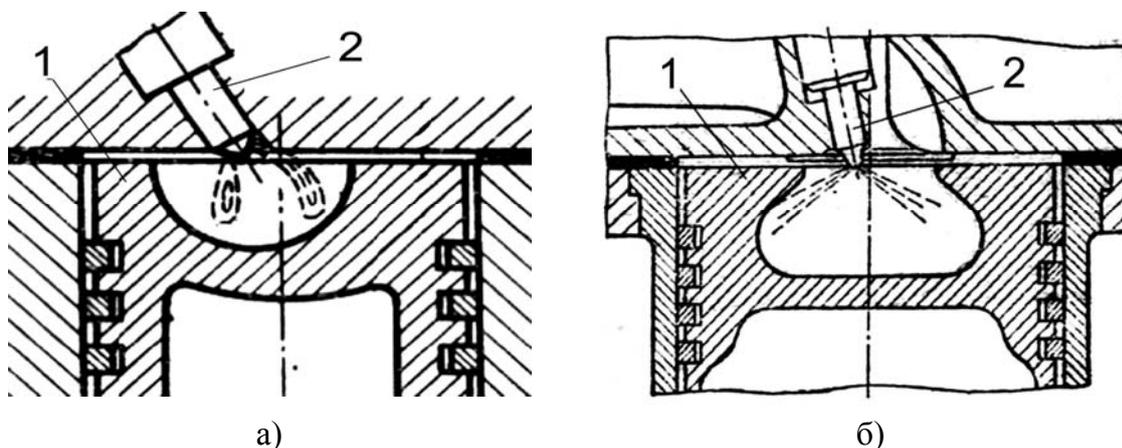


Рис. 2.1. Неразделенные камеры сгорания дизелей. Обозначения: а) полу-сферическая КС с объемным смесеобразованием; б) трапециидальная КС с объемно-пленочным смесеобразованием; 1 – поршень с камерой сгорания; 2 – форсунка

В настоящее время наиболее широко распространены двигатели с объемным смесеобразованием, отличающиеся лучшей топливной экономичностью.

В *предкамерных дизелях* топливо подается только в дополнительную камеру (*предкамеру* или *вихрекамеру*), где происходит образование смеси. Затем после воспламенения смесь вместе с продуктами сгорания через соединительный канал выбрасывается в основную КС (где находится только воздух), в которой происходит дополнительное перемешивание с воздухом и догорание (рис. 2.3).

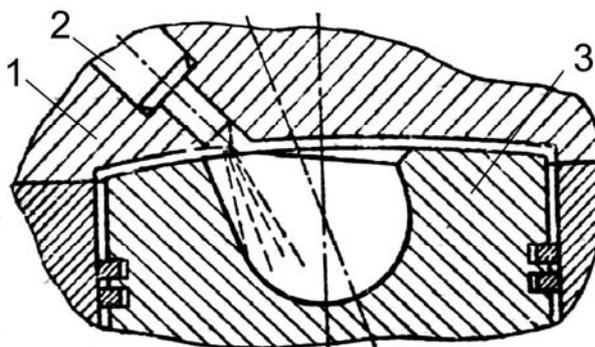


Рис. 2.2. Неразделенная камера сгорания дизелей с пленочным смесеобразованием. Обозначения: 1 – головка цилиндра, 2 – форсунка, 3 – поршень с камерой сгорания

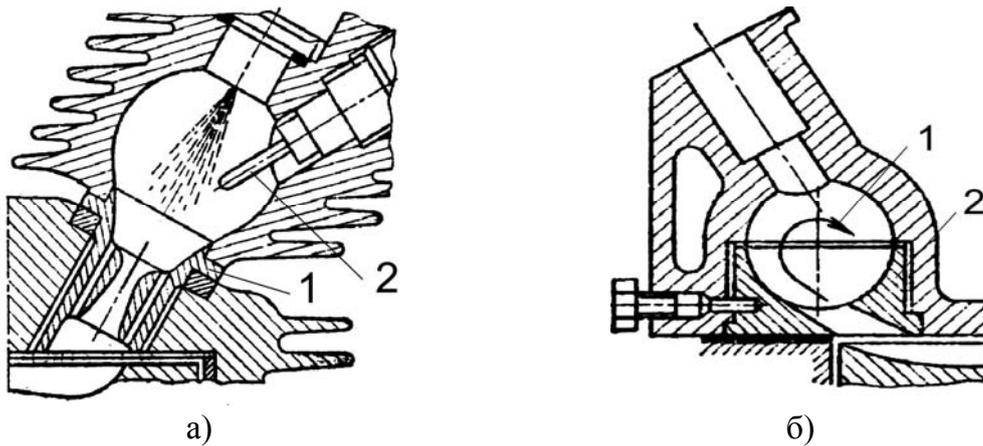


Рис. 2.3. Разделенные камеры сгорания дизелей. Обозначения: а) предкамера: 1 – жаропрочная вставка, 2 – свеча накаливания (для подогрева воздушного заряда); б) вихрекамера: 1 – направление движения воздушного заряда, 2 – жаропрочная вставка

3.2. Способ воспламенения смеси

Для поршневых ДВС характерны следующие способы воспламенения горючей смеси: искровое, накаленной поверхностью, сжатием и открытым пламенем.

Искровое воспламенение горючей смеси реализуется за счет подачи

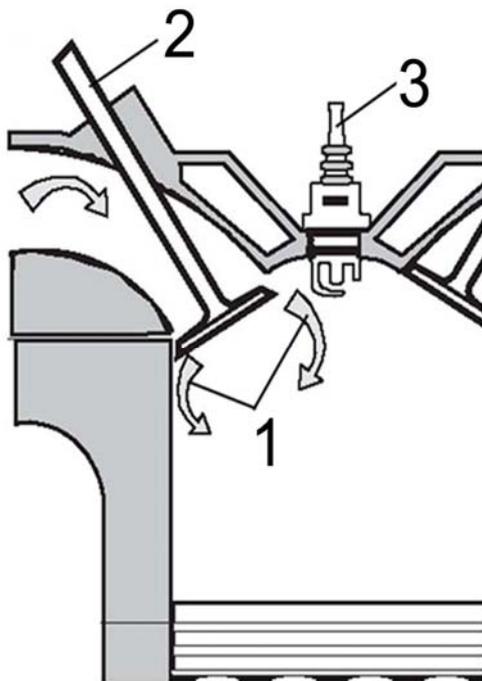


Рис. 2.4. Схема воспламенения топливовоздушной смеси искрой. Обозначения: 1 – движение смеси, 2 – впускной клапан, 3 – свеча зажигания

электрической искры в зоне смеси, при этом энергия искры должна превышать некоторое минимальное значение, называемое *минимальной энергией зажигания* (рис. 2.4).

Стабильность искрового воспламенения обуславливается также составом топливовоздушной смеси в зоне искры: в случае переобедненных и переобогащенных смесей воспламенение не происходит в связи либо с недостаточным тепловыделением (в первом случае), либо с большими теплотерями (во втором случае).

Искровое воспламенение характерно для воспламенения пред-

варительно перемешанных топлива и окислителя, т.е. для ДВС с внешним смесеобразованием. Хотя есть примеры такого типа воспламенения и предварительно неперемешанных реагентов – в дизелях с так называемым ГМ-процессом, а также в двигателях с впрыском легкого топлива (бензина) непосредственно в КС.

При *воспламенении горючей смеси накаливаемой поверхностью* температура поверхности должна быть выше некоторого значения. Эта предельная температура (ниже которой воспламенение не происходит) называется *температурой зажигания накаливаемой поверхностью*. Указанный тип воспламенения был реализован в *калоризаторных* двигателях (или *нефтянках*, так как в качестве топлива использовалась обычная нефть), широко применявшихся в 20...30 гг. XX века (рис. 2.5).

В этих двигателях предварительно разогретая от постороннего источника огня деталь (*калоризатор*) помещалась в головку цилиндра двигателя (для чего сначала снималась, а затем ставилась на место крышка головки цилиндра). Далее раскручивали вручную коленчатый вал двигателя, вследствие чего обеспечивался впрыск топлива в камеру сгорания. При этом топливо попадало на раскаленное тело, испарялось, перемешивалось с воздухом и воспламенялось в непосредственной близости от накаливаемой поверхности.

Подобный тип воспламенения горючей смеси возможен вследствие контакта либо с накаливаемой поверхностью (обычно свечами зажигания), либо с частицами нагара (находящимися в объеме цилиндра или на поверхности деталей камеры сгорания), вызывая *преждевременное воспламенение* (до подачи искры). Эти

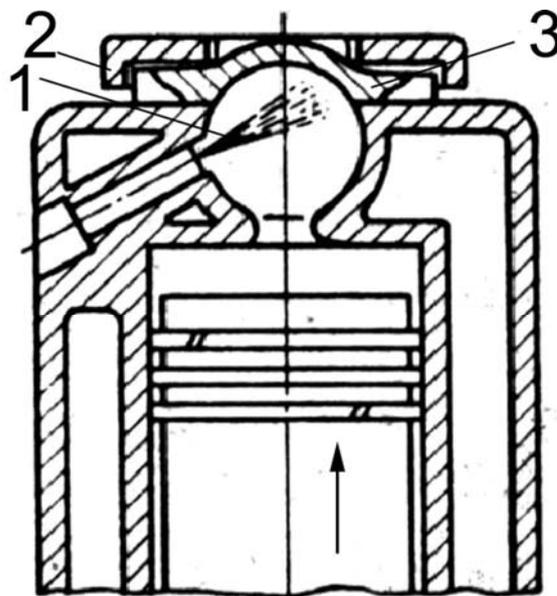


Рис. 2.5. Схема калоризаторного двигателя. Обозначения: 1 – струя топлива, 2 – крышка головки цилиндра, 3 – калоризатор. Стрелкой показано направление движения поршня в момент подачи топлива

два вида зажигания называются в первом случае *калильным зажиганием поверхностью* (КЗП) а во втором случае – *калильным зажиганием нагаром* (КЗН). Преждевременное воспламенение горючей смеси – явление нежелательное, поскольку приводит к снижению мощности и ухудшению экономичности двигателя, а также к увеличению теплонапряженности его деталей.

Воспламенение от сжатия обеспечивается за счет повышения температуры горючей смеси до некоторого предела, при котором начинается самопроизвольная химическая реакция, сопровождающаяся тепловыделением. Повышение температуры смеси при этом дополнительно возрастает, приводя к дальнейшему росту тепловыделения, что еще больше увеличивает температуру и т.д., пока не произойдет появление открытого (*горячего*) пламени.

Указанный тип воспламенения реализуется как при отдельной подаче топлива и окислителя в цилиндр двигателя – такой тип двигателей называется *дизелями*, так и при подаче предварительно подготовленной горючей смеси – двигатели с самовоспламенением гомогенной смеси (Homogeneous Charge Compression Ignition – HCCI) или двигатели с HCCI-процессом.

Воспламенение открытым пламенем реализуется в *форкамерных* двигателях с искровым воспламенением, отличающихся наличием двух КС – дополнительной (форкамеры) и основной (рис. 2.6).

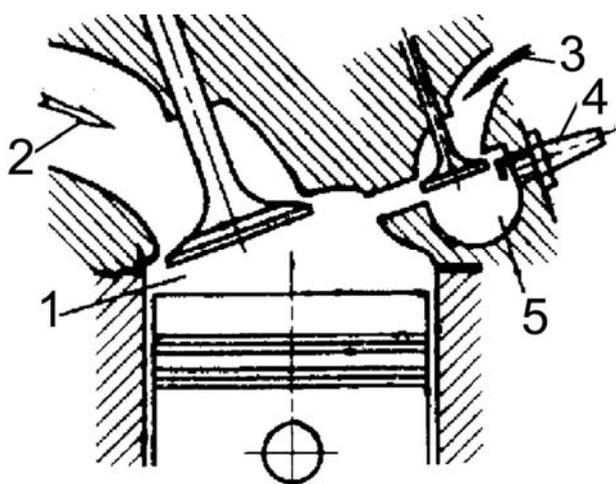


Рис. 2.6. Форкамерный двигатель. *Обозначения:* 1 – основная камера сгорания, 2 – обедненная смесь, 3 – обогащенная смесь, 4 – свеча зажигания, 5 – форкамера

Топливо подается в обе камеры сгорания. В дополнительной камере смесь обогащенная ($\alpha = 0,6 \dots 0,8$), а в основной – обедненная ($\alpha = 1,8 \dots 2,0$ – находящаяся за пределами воспламенения искрой).

В форкамере воспламенение обеспечивается за счет подачи искры; горящая смесь вместе с продуктами сгорания выбрасывается через соединительный канал в основ-

ную камеру, где поджигает находящуюся там переобедненную смесь, поскольку энергия открытого пламени в 1000 раз выше энергии искры.

3.3. Развитие процесса горения в ДВС с внешним смесеобразованием и принудительным воспламенением

В ДВС с внешним смесеобразованием и принудительным воспламенением сгорание практически гомогенной топливовоздушной смеси происходит за счет распространения волны горения, которая зарождается от постороннего источника воспламенения – свечи зажигания (рис. 2.7).

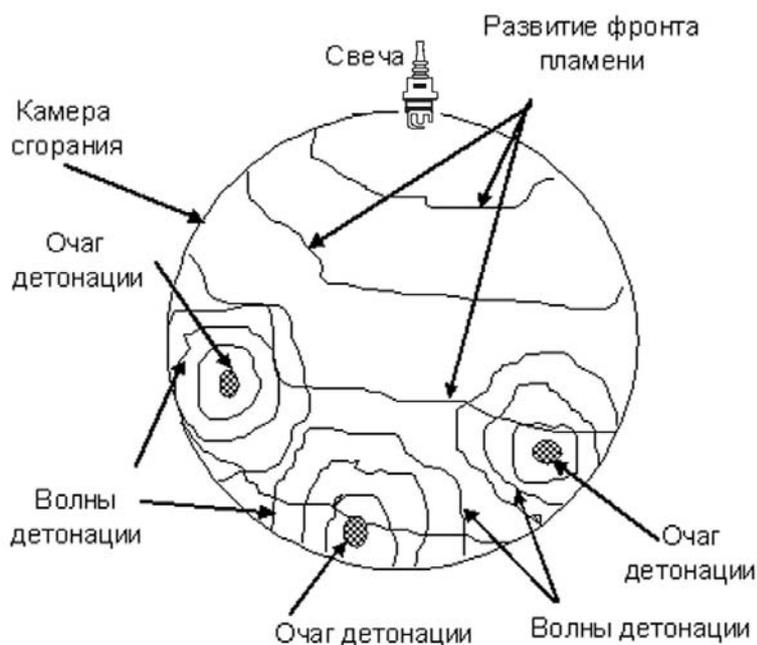


Рис. 2.7. Схема развития процесса сгорания топливовоздушной смеси в ДВС с принудительным воспламенением

При *распространении пламени*, т.е. движении пламени по газовой смеси, последняя делится на две части (рис. 2.8): сгоревший газ (продукты сгорания), через который пламя уже прошло, и несгоревший газ (свежая смесь), который вскоре войдет в область пламени. Граница между этими двумя частями называется *фронтом пламени*. Понятие «распространение пламени» объединяет в себе обширный ряд разнообразных явлений, которые могут быть

разделены на два основных класса пламен: *дозвуковых (дефлаграционных)* и *сверхзвуковых (детонационных)*. В связи с этим распространение пламени бывает двух типов: волна горения и детонационная волна.

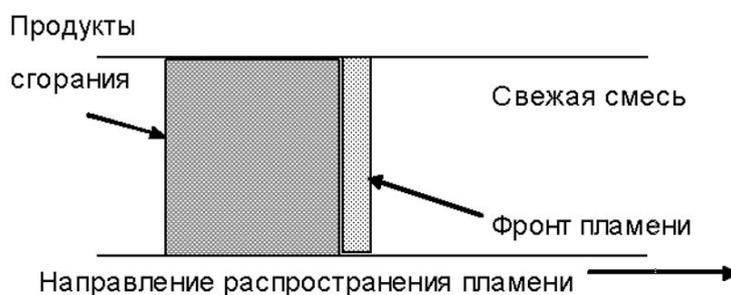


Рис. 2.8. Схема распространения фронта пламени

Волна горения характеризуется тем, что пламя распространяется посредством теплопередачи и диффузии активных молекул от фронта пламени, последовательно преобразуя несгоревший газ в продукты сгорания. Скорость распространения волны горения в камере сгорания двигателя значительно ниже скорости звука (последняя около 300 м/с). В этом случае разницей давления перед и за фронтом волны пламени можно пренебречь.

В зависимости от условий развития процесса горения и ударной волны в определенный момент ударная волна может вызвать детонацию, т.е. перейти в *детонационную волну*, распространение которой происходит за счет тепловыделения благодаря химическим реакциям во фронте пламени.

В ДВС с принудительным воспламенением возникновение детонационной волны (или просто детонации — “стук” — knocking) связано с самовоспламенением части топливовоздушной смеси за счет сжатия волнами давления, возникающими при распространении волн горения в тех зонах КС, куда сама волна горения еще не дошла.

Детонация — это процесс сверхзвукового распространения волны сжатия (ударной волны).

Исходным условием гидродинамической теории детонации является то, что реакция взрывного разложения осуществляется в зо-

не, непосредственно примыкающей к фронту детонационной волны. Фронт волны детонации движется с большой скоростью перпендикулярно поверхности этого фронта; за фронтом волны температура и давление скачкообразно повышаются. В связи с этим все реакции протекают в узком слое, непосредственно примыкающем к фронту детонационной волны (рис. 2.9).

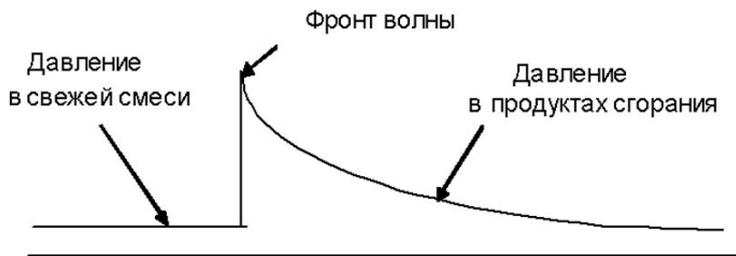


Рис. 2.9. Схема развития детонационной волны и давлением.

Этот слой перемещается вслед за фронтом волны с одинаковой с ним скоростью и оставляет за собой продукты сгорания с высокими температурой

Развитие детонации облегчается в случае накопления альдегидов и перекисей в период, предшествующий воспламенению, а также за счет наличия градиента температур в камере сгорания вследствие сжатия свежего заряда или воздуха. Даже наличие градиента в 10...20 градусов на фоне 1000 К может значительно облегчить возникновение детонации.

Волна детонации распространяется с постоянной скоростью U_d , зависящей от удельной энергии (теплотворности) смеси – Q_H :

$$U_d = (2 (\kappa^2 - 1) Q_H g)^{0,5},$$

где κ – показатель адиабаты сжатия в ДВС; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Поскольку показатель κ величина практически постоянная для условий сжатия в ДВС ($\kappa \approx 1,3 \dots 1,4$), то:

$$U_d \leq 4,3 Q_H.$$

В случае стехиометрических смесей: для дизельного топлива $U_d \leq 4300$ м/с ($Q_{H_H} \approx 42,7$ МДж/кг), а для бензина несколько больше – $U_d \leq 4730$ м/с ($Q_H \approx 44,0$ МДж/кг). Поскольку состав топливоздушная смеси в камере сгорания неоднороден, то истинное значение скорости распространения детонационной волны обычно не превышает 2500 м/с.

Детонация возникает при окислении топлива, находящемся в газообразном состоянии. В жидких топливах детонация не возни-

кает. Но если в жидком топливе есть незначительные включения любого газа (что всегда имеет место для условий ДВС), то необходимая для возникновения детонации энергия оказывается очень малой, так как газ в отличие от жидкости при сжатии быстро нагревается.

Развитие детонационной волны приводит к повышению давления в самой волне, не вызывая заметного повышения среднего давления в камере сгорания и превосходя последнее в 2...3 раза (см. таблицу).

Соотношение значений максимальных давлений в камере сгорания при нормальном и детонационном сгорании

Давление воспламенения P_c , МПа	Максимальное значение давления, МПа		Отношение		
	Нормальный режим P_z	Детонация P_d	P_d / P_c	P_z / P_c	P_d / P_z
22	31	90	4	3	3
25	34	78	3	2,3	2,3
27	-	65	2,4	-	-

Возникновение детонации в тепловых двигателях нежелательно. Это явление приводит к поломкам деталей двигателей вследствие механического воздействия ударной волной, а также ухудшает экономичность двигателя из-за разрушения пристеночных зон продуктов сгорания и масляной пленки на стенках цилиндров, приводя к повышенной теплоотдаче.

Скорость горения *предварительно перемешанных топлива и окислителя* определяется скоростью протекания химических реакций, т.е. *кинетикой* процесса. Величина же тепловыделения при горении зависит от состава смеси: максимальное тепловыделение характерно для смесей с составом, близким к стехиометрическому. При отклонении от стехиометрии тепловыделение снижается в связи с недостатком одного из реагентов, который в данном случае играет роль балласта, на нагревание которого тратится выделяющееся тепло.

3.4. Развитие процесса горения в ДВС с воспламенением от сжатия

В дизелях развитие процессов воспламенения и горения топлива существенно отличается от аналогичных процессов в двигателях с принудительным воспламенением. Горение предварительно перемешанных топлива и окислителя определяется в первую очередь физическими процессами смешения (*диффузии*). Соответственно основная задача процесса впрыскивания топлива заключается в предельно равномерном распределении топлива по объему камеры сгорания (КС) для вовлечения в процесс горения максимально возможного количества окислителя (процесс *макросмешения*) с целью сокращения времени на перемешивание реагентов. Следующим этапом является процесс *микросмешения* – смешение испаренного топлива с окислителем на молекулярном уровне.

Топливо в дизеле подается в движущийся воздушный заряд посредством истечения через сопловые отверстия распылителя за счет перепада давлений в системе топливоподачи и цилиндре ДВС. В первой – давление достигает 40,0...80,0 МПа, в некоторых типах двигателей – 150,0...200,0 МПа. В цилиндре дизеля – 3,5...4,0 МПа в безнаддувных двигателях и до 7,0...12,0 МПа в двигателях с наддувом. При распыливании жидкого топлива в воздушном заряде образуется двухфазная реагирующая струя – факел жидкого топлива. В зоне факела вследствие поглощения тепла смесью топлива с воздухом температура ниже, чем температура сжатого воздуха – около 500 °С против 600...800 °С. Эти температуры наряду с высокими давлениями сжатия в дизеле обеспечивают короткие задержки воспламенения (в пределах 0,7...10,0 мс).

Идеализированный процесс развития струи дизельного топлива в КС по времени и объему можно представить следующим образом. Смешение с воздушным зарядом обуславливает наличие распределения соотношения “воздух – топливо” в границах КС: на оси топливного факела концентрация топлива максимальна, т.е. коэффициент избытка воздуха $\alpha \rightarrow 0$ (жидкое топливо), а на границах КС топлива практически нет, т.е. $\alpha \rightarrow \infty$. Естественно предположить, что часть смеси находится в пределах воспламенения от

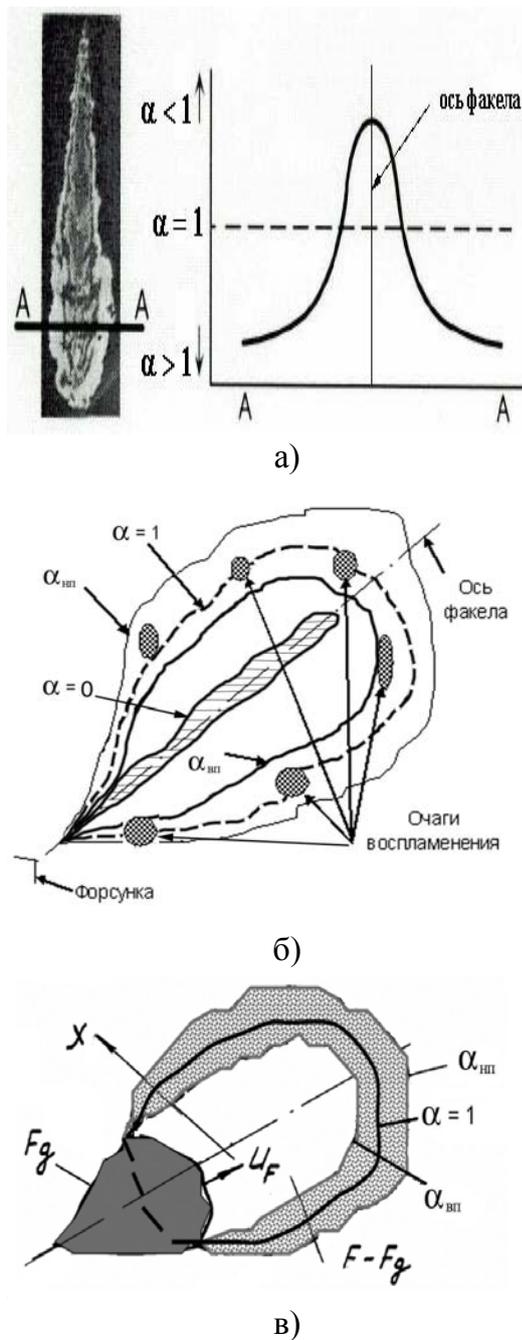


Рис. 2.10. Развитие процесса горения топлива в дизеле. *Обозначения:* а) концентрация топлива по сечению А – А топливного факела, б) схема воспламенения, в) формирование диффузионного фронта пламени

$\alpha_{нп}$ до $\alpha_{вп}$, в том числе и при $\alpha = 1$ (рис. 2.10, а).

Через некоторый промежуток времени (период задержки воспламенения) при достижении необходимой температуры на поверхности факела F происходит самовоспламенение, причем в зоне, соответствующей диапазону от $\alpha_{нп}$ до $\alpha_{вп}$ (рис. 2.10, б).

Фронты пламени от очагов воспламенения распространяются по подготовленной смеси, смыкаясь между собой и образуя сплошной фронт пламени, в который уже и поступают оставшиеся топливо и окислитель. Соответственно по мере выгорания топливо-воздушной смеси происходит формирование фронта диффузионного пламени на изоповерхности F_d с $\alpha = 1$ (*изостехиометрической поверхности*) (рис. 2.10, в). При этом если ширина фронта пламени при выгорании заранее подготовленной смеси (*в кинетическом режиме*) определяется размером зоны $\alpha_{нп} \dots \alpha_{вп}$, то в дальнейшем (*в диффузионном режиме*) – соотношением скорости смешения топлива и окислителя во фронте пламени (где $\alpha = 1$) и скоростью выгорания этой смеси (рис. 2.11).

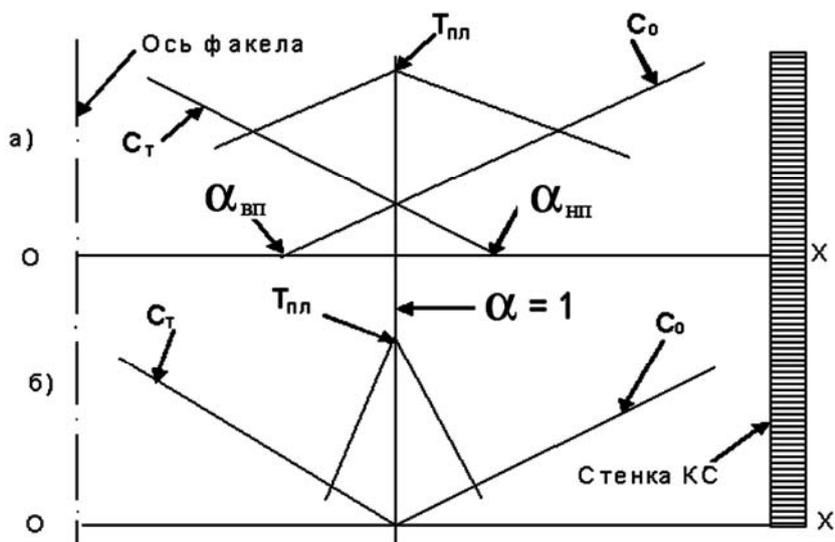


Рис. 2.11. Развитие процесса горения в дизеле. *Обозначения:* а) горение смеси, образованной за период задержки воспламенения, б) горение топлива, поступающего в диффузионный фронт пламени. C_O и C_T – приведенные концентрации окислителя и топлива; $\alpha = 1$ – положение изостехиометрической поверхности; $\alpha_{вп}$ и $\alpha_{нп}$ – верхний и нижний пределы распространения пламени; $T_{пл}$ – температура во фронте пламени; “ось факела” – продольная ось струи топлива, являющаяся продолжением продольной оси распылителя; “стенка КС” – стенка камеры сгорания; ОХ – оси, лежащие в плоскости, перпендикулярной оси факела

Рабочий процесс в дизеле является периодическим гетерогенным горением с ярко выраженной турбулентностью. Причем топливо и окислитель находятся первоначально в различных агрегатных состояниях: топливо – жидкость, окислитель – газ. Отличительными особенностями указанного режима горения являются следующие.

Периодичность обуславливает ограничение процесса горения по времени. В отличие от постоянно поддерживаемого режима горения данная особенность приводит в ряде случаев к преждевременному прекращению химической реакции горения (окисления), что является залогом отличия состава продуктов горения в этих двух случаях.

Диффузионный режим горения предопределяет необходимость затрат времени на предварительное перемешивание частиц топли-

ва и окислителя для обеспечения контакта на молекулярном уровне, без чего не может поддерживаться реакция горения. Данный фактор обуславливает повышенную неполноту сгорания по сравнению со случаем предварительного перемешивания топлива и окислителя.

Различное агрегатное состояние топлива и окислителя указывает на необходимость затрат времени на молекулярное смешение реагентов. Этот фактор будет предопределять повышенную неполноту сгорания по сравнению со случаем одинакового агрегатного состояния топлива и окислителя.

Как видно, наличие трех перечисленных особенностей является залогом повышенной трудности организации процесса горения для обеспечения быстрого и полного сгорания топлива.

Таким образом, в дизеле:

- одновременно существуют два режима горения: кинетический (подготовленной смеси) и диффузионный (образующейся во фронте пламени смеси за счет поступления в него топлива окислителя);

- геометрическое положение фронта пламени (поверхность, с $\alpha = 1$) – изостехиометрическая поверхность. Скорость реакции горения, а также температуры горения при отклонении от этого соотношения топлива и окислителя снижаются, поскольку возникает нехватка одного из реагентов, поэтому фронт пламени автоматически удерживается на указанной поверхности, перемещаясь вместе с ней за счет процессов макросмешения и выгорания;

- состав продуктов горения (и соответственно состав отработавших газов) зависит от соотношения количеств топлива, сгорающего в кинетическом и диффузионном режимах, и характеристик указанных режимов горения. В частности, чем больше период задержки воспламенения, тем больше накапливается готовой к воспламенению смеси, выше скорость нарастания давления и давление сжатия.

Характерной особенностью диффузионного режима горения является образование сажи. Процесс сажеобразования эндотермич-

ный, т.е. требующий затрат тепла. Поэтому чем большее количество топлива сгорает в диффузионном режиме, тем больше образуется сажи, ниже температура во фронте пламени, но при этом увеличивается теплоотдача за счет излучения частиц сажи. Последнее приводит к дополнительному нагреву поверхностей, образующих камеру сгорания, что крайне нежелательно (в отличие от горения топлив в печах и каминах).

Однако кроме дизельного процесса воспламенение от сжатия реализуется для случая подачи гомогенной топливовоздушной смеси – двигатели с НСЦИ-процессом. Подобный характер соотношения типа смесеобразования и способа воспламенения имеет свои преимущества и недостатки.

Преимущества:

- благодаря возможности сжигать сильно обедненные топливовоздушные смеси в условиях повышенных степеней сжатия, характерных для дизелей, а также отсутствию дросселирования на впуске в двигатель (в отличие от двигателей с искровым воспламенением) достигается больший КПД по сравнению с двигателями с внешним смесеобразованием;

- обедненная гомогенная топливовоздушная смесь является залогом незначительных концентраций образующихся оксидов азота вследствие пониженных температур горения, а также практически полным отсутствием в продуктах сгорания сажи благодаря предварительному смешению топлива с окислителем;

- предварительное смесеобразование и сжигание в условиях высоких степеней сжатия позволяет использовать практически любые виды топлив, т.е. обеспечивать многотопливность.

Недостатки:

- высокая скорость сгорания гомогенной топливовоздушной смеси приводит к высоким давлениям сгорания и как следствие к ускоренному износу деталей цилиндро-поршневой группы;

- трудность стабилизации момента самовоспламенения, что определяется температурой смеси, которая, в свою очередь, зависит от многих факторов в отличие от возможности контроля установкой момента впрыскивания топлива в дизелях или момента подачи искры в двигателях с принудительным воспламенением;

- небольшой диапазон мощности в связи с ограничением минимальной мощности бедным пределом воспламенения, а максимальной мощности – высоким значением давления сгорания;

- повышенные выбросы оксида углерода и несгоревших углеводородов топлива в связи с низкими температурами горения.

Таким образом, невозможность точного контроля момента воспламенения гомогенной смеси за счет сжатия вследствие качественного регулирования состава смеси при различных нагрузках является основной проблемой организации указанного типа процесса горения.

§ 4. Состав продуктов горения

Образование вредных веществ – результат сжигания топлива в цилиндре двигателя. В ДВС используют самые различные топлива, которые можно классифицировать, например, следующим образом:

- жидкие (нефть, моторное и дизельное топливо, бензин, спирты, масла и их эфиры) и газообразные (природный и попутные газы, биогазы, промышленные и генераторные газы);

- традиционные (моторное и дизельное топливо, бензин) и *альтернативные* (все кроме традиционных);

- невозобновляемые (ископаемые) и возобновляемые (*биотоплива* – вещества растительного и животного происхождения, продукты жизнедеятельности и органические отходы, образующиеся в процессе их переработки);

- природные и искусственные (получаемые с помощью технологий химической переработки каких-либо веществ).

Основным различием всех топлив как источника химической энергии является их *элементный* и *химический* составы, определяющие количество выделяемой энергии в виде тепла при сгорании единицы количества топлива (Дж/кг, Дж/м³). Под элементным составом понимается содержание в топливе химических элементов. В зависимости от типа топлива элементов может быть от двух до пяти; обязательно наличие углерода и водорода (кроме чистого водорода), а также могут присутствовать сера, кислород и азот (табл. ПЗ).

Химический состав – это содержание в топливе различных химических компонентов. Последние подразделяются на два типа: *горючую массу* и *балласт*. К горючей массе относятся углеводороды различного состава (C_xH_y), т.е. то, что при горении выделяет тепло. Балласт – это все остальное: азот, кислород, пары воды, минеральные составляющие, т.е. все то, что при горении топлива отбирает тепло на свое сгорание или же вообще не горит, но занимает долю в массе топлива. Наличие балласта приводит к снижению тепловыделения (теплотворности) при горении топлив, поскольку фактическое количество топлива определяется только количеством углерода и водорода (рис. 2.12).

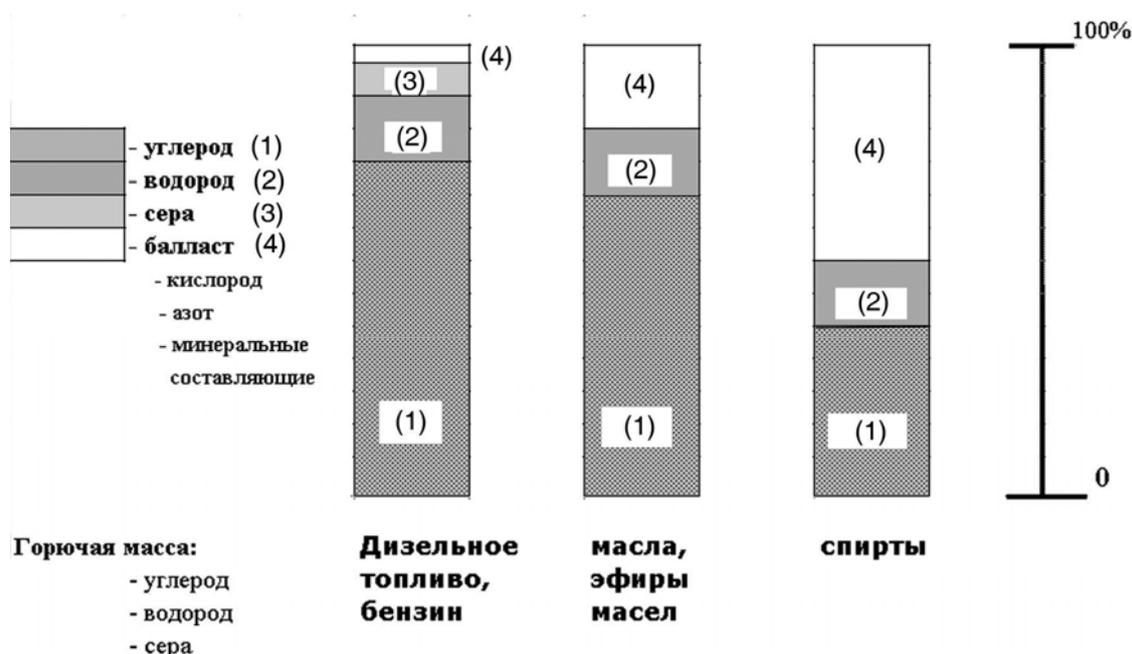


Рис. 2.12. Влияние элементного состава топлива на его теплотворность

В общем виде *состав топлива* – $C_xH_yO_rS_kN_l + Mи$. В первом слагаемом отражено наличие пяти основных химических элементов: углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S и азота N. Индексы (x, y, r, k и l) отражают соотношение элементов в молекуле топлива, второе слагаемое – минеральные составляющие, которые присутствуют только в жидких и твердых топливах. Причина их наличия – природное происхождение топлива.

В камере сгорания поршневых ДВС горит не только само топливо, но и часть смазочного масла, попадающего туда со стенок цилиндра, что определяет “*расход масла на угар*” (в современных

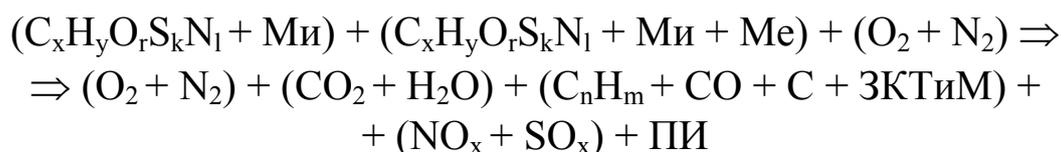
двигателях эта величина находится в пределах 0,15...0,30 % от расхода топлива). *Состав смазочного масла* отличается от состава топлива наличием оксидов металлов (Me), входящих в различные присадки к маслам: моющие, антикоррозионные, противопенные, антиокислительные, нейтрализующие и т.д. Поэтому в общем виде состав масла – $C_xH_yO_rS_kN_l + M_{и} + Me$.

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

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



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



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

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

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

$C_nH_m + CO + C + ЗКТиМ$ – продукты неполного сгорания топлива и масла: суммарные углеводороды, оксид углерода, сажа, а также зола и кокс топлива и масла;

$NO_x + SO_x$ – продукты окисления азота (в основном входящего в состав воздуха) и серы.

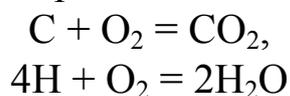
ПИ – продукты износа деталей двигателя.

Количество *остаточного кислорода* определяется в первую очередь типом рабочего процесса. В ДВС с принудительным воспламенением (бензиновые и газовые двигатели) состав топливовоздушной смеси близок к стехиометрическому, и коэффициент избытка

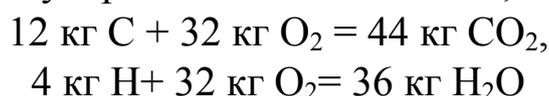
воздуха находится в пределах $\alpha = 0,85 \dots 1,15$. В итоге концентрация кислорода в ОГ обычно не превышает $2,0 \dots 3,0$ % (по объему). В дизелях содержание O_2 в ОГ зависит от наличия наддува и режима работы. На режиме холостого хода концентрация кислорода достигает 18 % по объему (при исходной концентрации кислорода в воздухе 21 %), а на режимах полной нагрузки – от $5,0 \dots 7,0$ % для ДВС со свободным впуском воздушного заряда до $10,0 \dots 13,0$ % для двигателей с наддувом.

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

Количество *продуктов полного сгорания* – диоксида углерода и паров воды – пропорционально расходу топлива: источник CO_2 – углерод топлива, а источник H_2O – водород топлива. В идеальном случае (*при полном сгорании всего топлива*) их содержание в ОГ определялось бы стехиометрическим соотношением:



Исходя из молекулярной массы элементов, можно записать:



Приведя оба выражения к 1 кг С и к 1 кг Н, получим:

- для сгорания 1 кг углерода топлива требуется $32/12 = 8/3 = 2,67$ кг кислорода, и при этом образуется $44/12 = 11/3 = 3,67$ кг углекислого газа;

- для сгорания 1 кг водорода топлива требуется $32/4 = 8$ кг кислорода, и при этом образуется $36/4 = 9$ кг воды.

При полном сгорании 1 кг дизельного топлива, состоящего на 87,0 % из углерода, 12,6 % из водорода и 0,4 % кислорода, образуется 3,2 кг CO_2 и 1,1 кг H_2O . При этом потребляется 3,32 кг атмосферного кислорода, что соответствует 14,3 кг воздуха (при содержании кислорода в воздухе 23,2 % по массе).

Причина образования *продуктов неполного сгорания* – углеводородов C_nH_m , оксида углерода CO и углерода C – неполнота сгорания исходных углеводородов топлива и масла. Присутствие в ОГ C_nH_m и CO отмечается не только при $\alpha < 1,0$, но и в отличие от теоретического подхода при $\alpha \geq 1,0$. Это характеризует несовершенство процесса смесеобразования и сгорания: в первую очередь, отклонение состава топливовоздушной смеси от среднего значения α , а во-вторых, недостаточно высокая температура горения в отдельных зонах КС (что приводит к их неполному окислению).

Из всех продуктов сгорания именно *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 (так называемому *углеродному числу*). При этом состав углеводородов, присутствующих в ОГ, отличается от исходного состава углеводородов топлива и масла, поскольку под воздействием высокой температуры происходит их распад.

Однако 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;

- в двигателях с воспламенением от сжатия – при отсутствии самовоспламенения.

Внешним проявлением избыточного содержания углеводородов в ОГ является густой серо-белый дым.

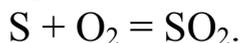
Наличие *углерода C* (в виде сажи) в ОГ характерно для дизелей при их работе при максимальных нагрузках (хотя и в этом случае $\alpha > 1,0$). Подобная ситуация отражает особенности горения предварительно неперемешанных топлива и окислителя (так называемое *диффузионное горение*) в отличие от горения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

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

Присутствие в ОГ *золы и кокса* связано с наличием в топливе и масле минеральных составляющих, которые не горят. Наличие ЗКТиМ в ОГ поршневых ДВС невелико, так как в жидких топливах содержание минеральных веществ незначительно в отличие от твердых топлив, где их концентрация может достигать 10 %. В газообразных топливах минеральных веществ нет.

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

Продукты окисления серы S представлены в ОГ парами серной кислоты H_2SO_4 и твердыми сульфатами MSO_4 . Наличие каждого из этих продуктов обусловлено как уровнем температуры, так и степенью взаимодействия с другими продуктами горения, находящимися в потоке ОГ (причем не только в КС, но и в выпускном трубопроводе). Первоначально же в КС проходит реакция с образованием сернистого ангидрида



Исходя из молекулярной массы элементов, можно записать



Приведя выражение к 1 кг S, получим, что для сгорания 1 кг серы топлива требуется $32/32 = 1$ кг кислорода, и при этом образуется $64/32 = 2$ кг диоксида серы.

Наличие в ОГ *продуктов износа (ПИ) деталей* двигателя обусловлено износом трущихся пар: “цилиндр – поршень”, “коленчатый вал – вкладыши”, “стержень клапана – направляющая втулка”, пары шестерен и т.д. ПИ попадают в масло, а вместе с маслом 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 головок цилиндров.

Внешним проявлением избыточного попадания масла в КС является окрашивание ОГ в синий цвет.

Контрольные вопросы

1. Основные характеристики процессов горения.
2. Три основных условия воспламенения топливовоздушной смеси.
3. Типы воспламенения.
4. Способы смесеобразования.
5. Развитие процесса горения при внешнем смесеобразовании и принудительном воспламенении.
6. Различия между ударной волной и детонацией.
7. Развитие процесса горения в дизелях.
8. Типы камер сгорания в дизелях и двигателях с принудительным воспламенением.
9. Развитие процесса горения в ДВС с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия.
10. Преимущества и недостатки процесса с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия.
11. Химический и элементный состав топлив.
12. Горючая масса топлив и балласт.
13. Влияние элементного состава топлив на их теплотворность.
14. Что такое “расход масла на угар”, чем определяется и каким образом это влияет на состав продуктов сгорания.
15. Реакция окисления топлива и смазочного масла?
16. Реакции горения углерода, водорода и серы.
17. Реакции образования диоксида углерода, паров воды и диоксида серы.
18. Внешнее проявление процессов неполного сгорания углеводородов топлива и масла.
19. Продукты износа деталей двигателя: причины их появления в отработавших газах двигателя.
20. Состав и количество продуктов полного сгорания 1 кг дизельного топлива (1 л бензина, 1 м³ метана).

Глава 3. ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

- Топливо и масло • Переобедненные и переобогащенные зоны*
- Температура горения и продуктов сгорания
 - Тип смесеобразования
 - Крекинг
 - Время витания
 - Порозность. Термический, быстрый и топливный оксиды
 - Механизм Зельдовича
 - Эффективный объем образования
 - Подвижность реакции
 - Закалка

§ 1. Углеводороды

1.1. Смазочное масло

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

Воздействию высокой температуры продуктов сгорания топливозооудушной смеси подвергается масло, находящееся на стенках цилиндра выше уровня верхнего поршневого кольца, куда масло проникает в связи с насосным действием поршневых колец (рис. 3.1).

При движении поршня от ВМТ к НМТ (стрелка направлена вниз) нижнее поршневое кольцо под действием сил инерции прижимается к верхней плоскости поршневой канавки. При этом масло со стенок цилиндра сгребается поршневым кольцом в освободившееся пространство канавки.

При движении поршня в обратном направлении – от НМТ к ВМТ (стрелка направлена вверх) – кольцо прижимается к нижней части канавки, и масло выжимается в освободившееся пространство в сторону следующего кольца. При очередном движении поршня от ВМТ к НМТ все повторяется и т.д. Именно таким образом часть масла попадает в КС.

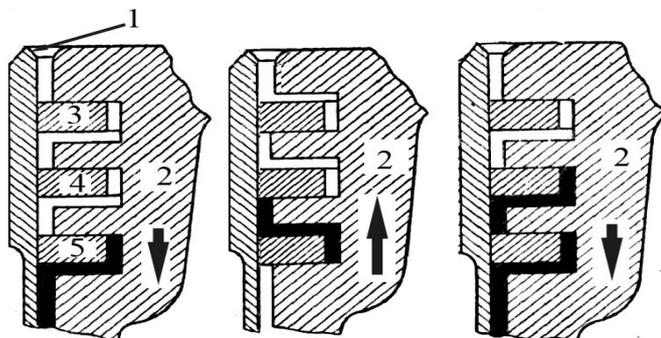


Рис. 3.1. Схема насосного действия поршневых колец. Обозначения: 1 – стенка цилиндра, 2 – поршень, 3...5 – поршневые кольца. Стрелкой указано направление движения поршня

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

На расход масла на угар оказывают влияние следующие факторы: испаряемость масла, конструкция цилиндра и поршня, качество обработки и степень износа трущихся поверхностей. Минимальный расход масла на угар наблюдается при наработке двигателя 125...500 часов; при меньшей наработке идет процесс приработки трущихся поверхностей, при большей – износ поверхностей и соответственно увеличение зазоров.

1.2. Внешнее смесеобразование

Существенное влияние на процесс недогорания углеводородов оказывает *тип смесеобразования* – предварительное перемешивание топлива и окислителя. Это значит, что в цилиндр подается готовая горючая смесь, которая находится там в течение процессов впуска и сжатия. За это время смесь равномерно распределяется по всему объему. Но та часть смеси, которая находится около поверхностей цилиндра, головки цилиндра и поршня, после воспламенения оказывается в зоне пониженных температур вследствие теплоотдачи в стенки деталей. В этих зонах пламя гаснет, соответственно полного сгорания быть не может. Скорость же сгорания смеси определяется в первую очередь скоростью химических реакций (кинетикой), зависящих от температуры.

Кроме того, при работе двигателя с принудительным воспламенением содержание углеводородов в ОГ связано и с процессом продувки цилиндра во время *перекрывтия впускного и выпускного клапанов*.

Эмиссия углеводородов с ОГ велика как для бедных, так и для богатых смесей (рис. 3.2). При *обеднении* смеси это обусловлено *низкими температурами горения* и продуктов сгорания, определяющими низкую скорость реакции окисления. В результате процесс горения затягивается и переходит на такт расширения, что приводит к еще большему снижению температуры и соответственно

скорости реакции окисления углеводородов. При крайне сильном обеднении недогорание возможно вследствие *пропусков зажигания*.

В *богатых* смесях процесс окисления идет не полностью из-за *недостатка окислителя*. В этом случае процесс окисления углеводородов (как исходных, так и разложившихся на более простые) продолжается в выпускном трубопроводе в процессе выпуска продуктов сгорания.

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

- отложения 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 неустойчивости рабочих циклов;
- попадание смазочного масла в КС из зазоров между поршнем и цилиндром, а также между направляющими втулками и стержнями впускного и выпускного клапанов;
- вынос части топливовоздушной смеси из впускного трубопровода в выпускной при перекрытии впускного и выпускного клапанов.

Схема, поясняющая наличие углеводородов в ОГ двигателей с внешним смесеобразованием (на примере конструкции с впрыском бензина во впускной канал головки цилиндров), представлена на рис. 3.3. Для ДВС с карбюратором – схема аналогична, а для ДВС с впрыском бензина непосредственно в КС – аналогично схеме, характерной для дизелей [42].

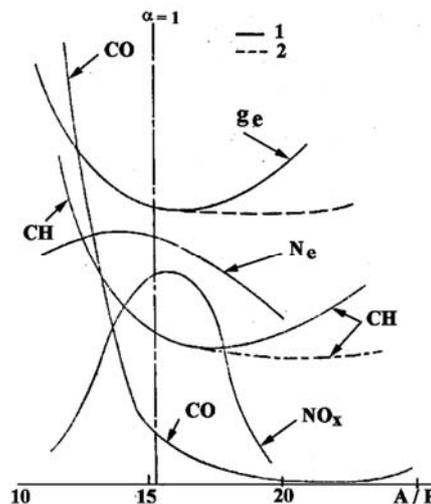


Рис. 3.2. Изменение концентрации ВВ в ОГ и удельного расхода топлива по составу смеси двигателя с внешним смесеобразованием. Обозначения: 1 – обычный ДВС, 2 – ДВС, работающий на обедненной смеси

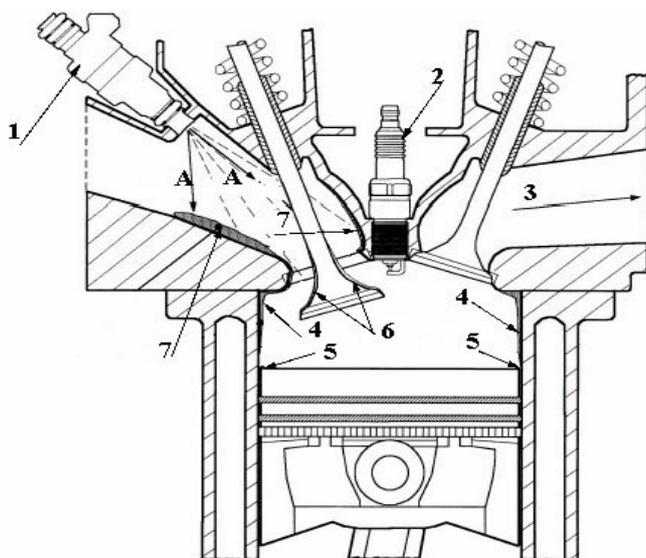


Рис. 3.3. Источники наличия углеводородов в ОГ двигателей с внешним смесеобразованием. Обозначения:

- 1 – форсунка, 2 – свеча зажигания,
- 3 – поток ОГ в выпускном канале,
- 4 – пристеночные зоны гашения пламени, 5 – прорыв масла в КС из зазора “поршень – цилиндр”, 6 – поверхность впускного клапана, 7 – пленка на стенках впускного канала, А – направление распыливания топлива форсункой

1.3. Внутреннее смесеобразование

На недогорание углеводородов топлива в ДВС с внутренним смесеобразованием (в дизелях, а также в двигателях с принудительным воспламенением и непосредственным впрыскиванием топлива в КС) оказывает влияние (не говоря о химическом составе) множество самых разнообразных факторов:

- физические характеристики топлива (вязкость, температура);

- характеристики топливоподачи (геометрия и количество топливных факелов, мелкость распыливания);

- характер движения воз-

душного 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.

Таким образом, источником несгоревших углеводородов в дизеле будет наличие в КС зон как с переобедненной топливовоздушной смесью, так и переобогащенной. Соответственно полнота сгорания будет определяться недостатком одного из компонентов (то-

плива или окислителя). То есть механизм аналогичен горению бедных и богатых смесей в ДВС с внешним смесеобразованием, в том числе и той части смеси, которая окажется в пристеночных зонах гашения пламени.

Большое влияние на недогорание углеводородов топлива оказывает тип смесеобразования – внутреннее, т.е. в цилиндре, что определяет гораздо меньшее время на процессы перемешивания и испарения топлива по сравнению с ДВС с внешним смесеобразованием. В дизеле эти процессы, а также воспламенение и горение идут одновременно, параллельно. Поэтому на полноту сгорания углеводородов топлива оказывают влияние *скорости процесса смешения топлива с окислителем*. При недостаточной интенсивности смешения топливо не успевает поступить в диффузионный фронт пламени (см. рис. 2.11, б), а при слишком большой интенсивности топливо “проскакивает” через фронт пламени. Именно по этой причине для каждого рабочего процесса существует оптимальное значение *вихревого отношения* (отношение частоты вращения воздушного заряда, рассматриваемого как твердое тело, к частоте вращения коленчатого вала): малоинтенсивное и чрезмерно интенсивное смесеобразование обуславливают снижение полноты сгорания.

Кроме того, источником углеводородов являются процессы *подпрыска* топлива из форсунки при неконтролируемом отскоке иглы распылителя от седла, а также *подтекания топлива* из распылителя форсунок за счет наличия остатков топлива в подыгольном пространстве распылителя. В обоих случаях давления топлива недостаточно для качественного смесеобразования, и попадающее в КС таким образом топливо будет образовывать переобогащенные зоны.

В ОГ дизелей концентрация углеводородов ниже в 5...7 раз по сравнению с ДВС с внешним смесеобразованием, что обусловлено значительно меньшим временем пребывания топлива в КС до момента воспламенения. Результатом является незначительно количество топливовоздушной смеси, располагающейся в холодной пристеночной зоне.

В связи с качественным регулированием состава смеси при низких нагрузках (и соответственно малых цикловых подачах топли-

ва) отношение массы окислителя к массе топлива велико. Поэтому велики и теплопотери на подогрев избыточного количества окислителя. Результатом является низкий общий температурный фон в КС, что приводит к увеличению количества не полностью сгоревших углеводородов топлива. Этому способствует также и тот факт, что для обычных отдельных систем топливоподачи давление впрыскивания топлива пропорционально величине цикловой подачи топлива. Таким образом, при низких цикловых подачах давление впрыскивания топлива низкое, что ухудшает условия распыливания топлива и соответственно затрудняет смесеобразование. При больших нагрузках (при больших цикловых подачах топлива) увеличивается доля топлива, не поступившего своевременно во фронт пламени. В диапазоне же средних нагрузок условия для процессов смесеобразования и сгорания оптимальны, поэтому и концентрация несгоревших углеводородов топлива минимальна. Что касается расхода масла на угар, то его количество в основном изменяется пропорционально скоростному режиму (рис. 3.4).

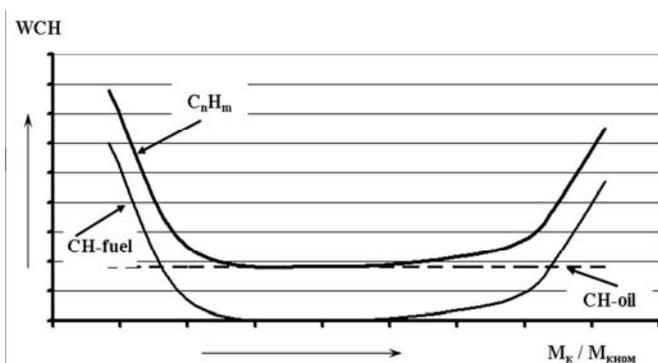


Рис. 3.4. Характерная зависимость концентрации несгоревших углеводородов в ОГ дизелей от нагрузки. Обозначения: CH-oil, CH-fuel и C_nH_m – несгоревшие углеводороды масла и топлива и суммарные соответственно

Распад исходного углеводородного топлива состава C_xH_y в ходе рабочего процесса на более простые углеводороды обуславливает наличие в ОГ как минимум несколько 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 CH₄ – процесс может иметь до 200 промежу-

точных стадий, а для более тяжелых углеводородов количество стадий увеличивается до нескольких тысяч (табл. 3.1).

При испытаниях ДВС и транспортных средств принято оценивать концентрацию углеводородов в ОГ по суммарным углеводородам C_nH_m в пересчете на какой-либо индивидуальный углеводород: или метан, или пропан, или на условный углеводород состава $C_1H_{1,85}$. При этом, естественно, точный групповой состав по углеродному числу ($C_1, C_2, C_3 \dots C_n$) не выполняется. Сложность данной задачи заключается в том, что топливо (дизельное, бензин) представляет собой сочетание различных исходных углеводородов C_xH_y , зависящее, во-первых, от месторождения нефти, из которой получили в дальнейшем топливо; а во-вторых, от технологии переработки нефти. Поэтому можно достоверно говорить только о групповом углеводородном составе конкретной партии топлива, на которой проводят испытания [1].

Таблица 3.1

Горение водорода H_2 и углеводородов C_xH_y в воздухе

Топливо	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

Примечание. Дизельное топливо по своему среднему молекулярному составу близко к цетану.

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 расширения при пониженных температурах (рис. 3.5 [6]).

§ 2. 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 переобогащения (или, наоборот, при забросе капель топлива во фронт пламени) и в случае недостатка времени на испарение топлива с последующим перемешиванием с окислителем происходит процесс дегидрогенизации углеводородных молекул.

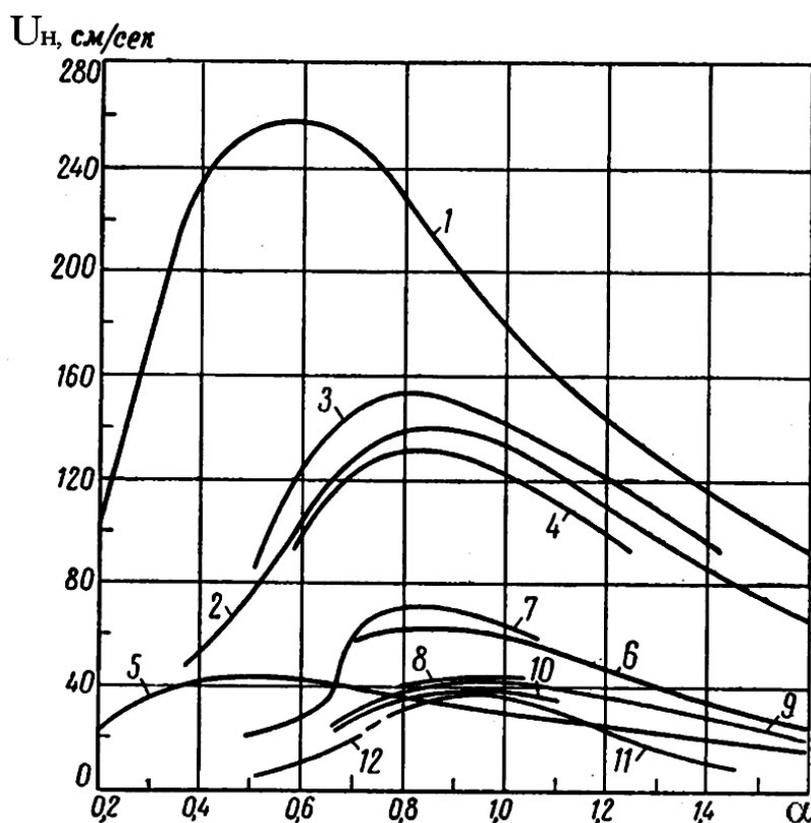


Рис. 3.5. Скорость распространения пламени в зависимости от углеводородного состава смеси. Обозначения: 1 – водород H_2 , 2...4 – ацетилен C_2H_2 , 5 – окись углерода CO , 6...7 – этилен C_2H_4 , 8 – пропилен C_3H_6 , 9 – пропан C_3H_8 , 10 – бензол C_6H_6 , 11...12 – метан CH_4

Данный механизм характерен для двигателей как с внутренним, так и внешним смесеобразованием, в том числе и для газовых двигателей (даже использующих в качестве топлива метан). 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 сажей. Последнее обстоятельство приводит к более длительному существованию в воздухе (большему *времени витания*) именно частиц сажи от бензиновых двигателей, а соответственно и большому 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, что характеризуется предельной высотой ламинарного пламени $h_{пр}$ (рис. 3.6 [3]).

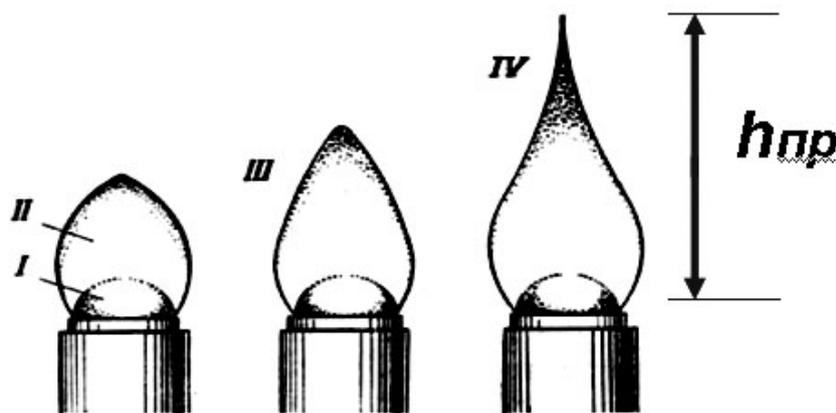


Рис. 3.6. Схема образования сажи при диффузионном горении. Обозначения: I – темная зона, II – светящаяся зона, III – начало образования сажи, IV – появление жгута копоти, $h_{пр}$ – предельная высота пламени, при котором происходит появление жгута сажи

При диффузионном горении зона образования сажи непосредственно примыкает к фронту пламени, располагающемуся на изостехиометрической поверхности F_d (см. рис. 2.10) со стороны из-

бытка топлива (зона с $\alpha < 1$). Это определяется недостатком окислителя и высоким значением температуры пламени $T_{пл}$, при которых и идет процесс крекинга (рис. 3.7).

Наряду с образованием сажи происходит ее выгорание. При этом сажа, диффундирующая из зоны своей наибольшей концентрации через фронт пламени в сторону избытка окислителя, сгорает. Та же часть сажи, что диффундирует внутрь, т.е. в сторону жидкого топлива, не сгорает, обуславливая содержание сажи в отработавших газах дизеля. Количество образующейся сажи пропорционально цикловой подаче топлива.

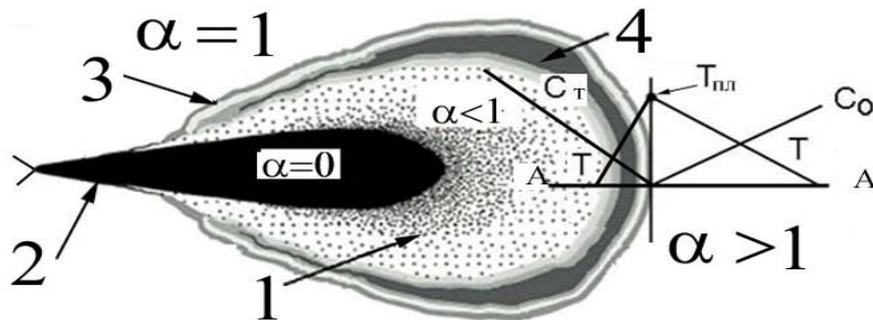


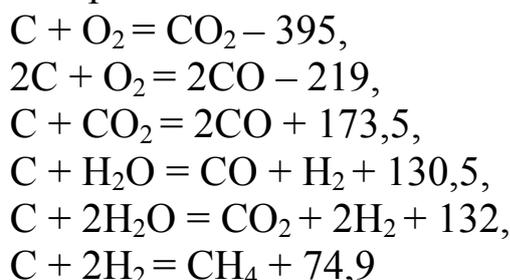
Рис. 3.7. Схема образования сажи при диффузионном горении топливного факела. Обозначения: 1 – пары топлива внутри топливного факела (зона с $\alpha < 1$), 2 – жидкое ядро топливного факела ($\alpha = 0$), 3 – фронт диффузионного пламени ($\alpha = 1$), 4 – зона образования сажи ($\alpha < 1$), $T_{пл}$ – температура во фронте диффузионного пламени, C_o , C_T – приведенные концентрации окислителя и топлива, T – температурное поле, А-А – сечение, перпендикулярное поверхности диффузионного фронта пламени (см. рис. 2.10)

Поверхность углеродистых частиц изрезана огромным количеством микротрещин и пор различных формы и размеров, т.е. отличается высокой степенью *порозности*. Поры могут быть сквозными, причем внутренняя поверхность пор может быть больше внешней поверхности частицы сажи. Горение сажи (твердого углерода C_4) – *гетерогенный* процесс: углерод – твердая фаза, окислитель – газ. Скорость этого процесса определяется как кинетикой горения самих частиц (на поверхности и в глубине), так и диффузионным пе-

реносом кислорода и продуктов сгорания у горячей поверхности частицы. Вследствие порозности углерод горит не только на поверхности, но и внутри.

При теоретическом анализе неучет внутреннего горения частиц сажи приводит к большим ошибкам при обработке экспериментального материала.

При горении (окислении) углерода за счет реагирования с кислородом, диоксидом углерода и парами воды образуются CO и CO₂. Принято считать реакцию горения углерода реакцией первого порядка. Основные реакции окисления углерода следующие (справа указаны тепловые эффекты реакции: ”–“ – реакция эндотермична, т.е. для ее протекания необходимы затраты тепла; “+” – реакция экзотермична, т.е. при протекании реакции выделяется тепло), кДж/моль:



Количество образующейся сажи пропорционально величине цикловой подачи топлива, т.е. нагрузке на двигатель. Именно содержание сажи обуславливает черный цвет ОГ, соответственно уровень непрозрачности (или *дымности*) потока ОГ пропорционален нагрузке на двигатель (рис. 3.8).

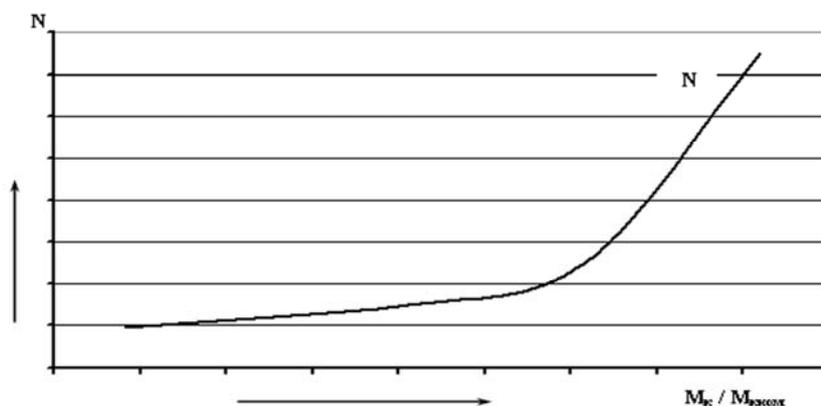


Рис. 3.8. Характерная зависимость дымности отработавших газов дизелей от нагрузки. Обозначения: N – дымность ОГ; M_к и M_{кном} – текущее и номинальное значения крутящего момента

Подобная зависимость характерна для всех типов ДВС, в которых реализуется горение предварительно неперемешанных топлива и окислителя: как с воспламенением от сжатия, так и в случае принудительного воспламенения.

§ 3. Оксид углерода

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. Последнее обстоятельство обуславливает частичное окисление распавшихся углеводородов.

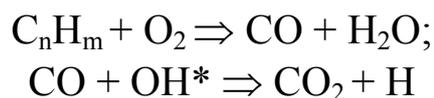
Вторым источником образования СО является, наоборот, процесс диссоциации CO_2 в зоне высоких (более 2000 К) температур (т.е. в зоне фронта пламени):



В двигателях с *внешним смесеобразованием* образование оксида углерода определяется главным образом составом топливовоздушной смеси. Для богатых смесей ($\alpha < 1$) концентрация СО в ОГ пропорциональна избытку топлива относительно окислителя, а для бедных ($\alpha > 1$) – практически постоянна (см. рис. 3.2).

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

Однако данное положение сохраняется приблизительно до момента, соответствующего 60 °пкв за ВМТ положения поршня на такте расширения. После чего возникает неравновесность концентрации СО в продуктах сгорания из-за уменьшения скорости реакции вследствие снижения температуры продуктов сгорания, т.е. происходит замораживание (*закалка*) концентрации СО.



В *дизелях* образование CO связано с характером пространственной неоднородности концентраций топлива и окислителя и температуры в камере сгорания. В фазе формирования диффузионного фронта пламени процесс горения идет в пределах от нижнего до верхнего коэффициентов избытка воздуха. В данном случае образование оксида углерода связано как с характером распределения локального коэффициента избытка воздуха, так с количеством топливовоздушной смеси, находящейся в указанной зоне. В фазе диффузионного режима горения ширина фронта пламени резко сужается и фактически становится поверхностью раздела топлива и окислителя. Последнее обстоятельство способствует интенсивному распаду топлива, скорость окисления которого будет зависеть от уровня температуры в зоне реакции (см. рис. 2.11). Характерная зависимость содержания CO в отработавших газах дизелей соответствует аналогичной зависимости суммарных углеводородов (см. рис. 3.4).

§ 4. Оксиды азота

В отработавших газах ДВС оксиды азота представлены как оксидом NO, так и диоксидом NO₂. Однако на 95...99 % – это оксид азота, который окисляется до NO₂ вследствие понижения температуры ОГ при их попадании в атмосферу. Большие цифры относятся к бензиновым двигателям, в которых температуры в КС в зоне продуктов горения выше, чем в дизелях в связи с меньшими теплотерями из-за более высокой скорости сгорания. Поэтому, когда рассматривают процесс образования оксидов азота в процессе горения, то имеется в виду оксид NO.

Различают три возможных пути образования оксида азота при горении топлив.

1. *Термический оксид азота* – результат окисления азота воздуха кислородом воздуха под воздействием высоких (не менее 2000 К)

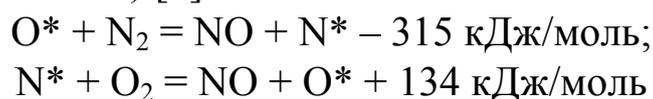
температур, т.е. реакция идет в зоне продуктов сгорания. При этом ни химический состав топлива, ни величина давления в КС непосредственного влияния на процесс окисления азота не оказывают – все определяется уровнем температур (*термическая природа образования NO доказана академиком Я.Б. Зельдовичем [8, 9]*).

2. Если в топливе имеются азотсодержащие соединения, то азот высвобождается при сравнительно низких температурах с образованием *топливного оксида азота* [30].

3. При столкновении углеводородных радикалов с молекулой азота в зоне реакции горения (во фронте пламени) образуется *быстрый оксид азота* [23]. В этом случае количество образующегося NO пропорционально давлению.

Основная роль принадлежит термическим оксидам азота; роль двух других источников по мере повышения температур и давлений при горении уменьшается. А для условий горения в ДВС, где при сгорании углеводородовоздушных смесей (содержащих крайне незначительное количество азота в топливе) развиваются достаточно высокие температуры (2000...2800 К), термический механизм носит решающий характер [7, 22, 24, 32, 36...40].

Образование термического оксида азота происходит по цепному механизму согласно двум основным реакциям (*механизм академика Н.Н. Семенова*) [8]:



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

Содержание оксида азота в продуктах сгорания зависит от температуры горения, содержания кислорода в продуктах сгорания

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

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

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

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

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

Средняя скорость реакции в рассматриваемом объеме может существенно отличаться от скорости реакции при средней температуре в этом объеме [2].

Способность реакции окисления азота следовать за равновесным составом по условиям концентрации реагентов и величине температуры называется *подвижностью реакции* образования оксида азота. Если это условие выполняется, то имеет место *высокая подвижность*, если же нет – то *малая подвижность* (рис. 3.9 [8]).

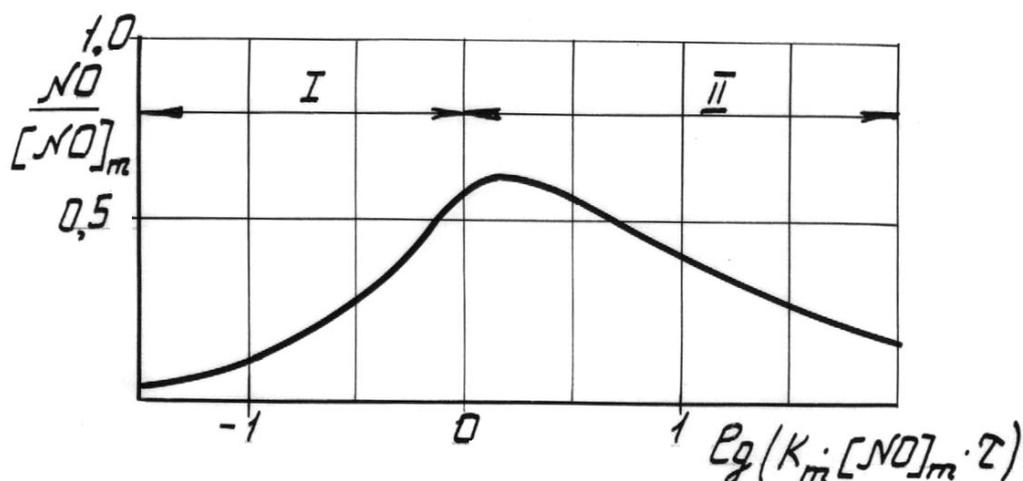


Рис. 3.9. Теоретическая кривая критерия подвижности. *Обозначения:* I – зона малой подвижности, II – зона высокой подвижности; NO и $[NO]_m$ – текущее и максимальное равновесное значения концентрации оксида азота, $\lg(K_m [NO]_m \tau)$ – критерий подвижности, $NO / [NO]_m$ – безразмерный выход оксида азота

В табл. 3.2 показана зависимость времени достижения равновесного количества оксида азота от температуры сгорания смеси (т.е. параметр, характеризующий скорость протекания реакции образования оксида азота).

Таблица 3.2

Зависимость времени достижения равновесного количества оксида азота от температуры сгорания смеси [9]

T, K	1750	2000	2250	3000	4000
τ , с	140	1	$5,3 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-7}$

Исследования, проведенные с помощью стробоскопического газоотбора (рис. 3.10, а [31]), показали, что время образования основного количества оксида азота занимает $2,2 \cdot 10^{-3} \dots 6,2 \cdot 10^{-3}$ с (20...30 °пкв) (рис. 3.10, б [31]).

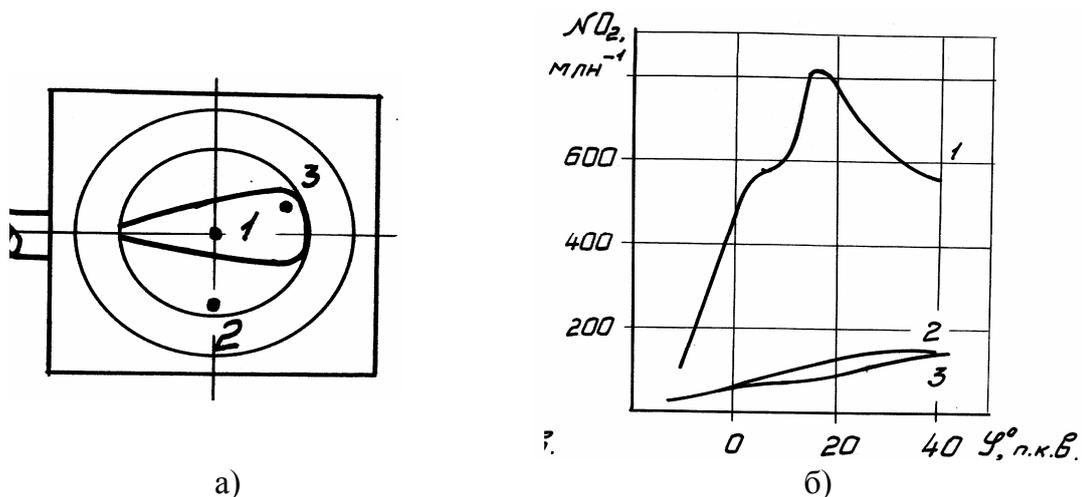


Рис. 3.10. Схема и результаты газоотбора из отдельных зон КС ДВС.
 Обозначения: 1 – газоотбор из зоны развития струи топливного факела; 2 – газоотбор из пристеночного слоя КС; 3 – газоотбор с периферии топливной струи

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

В двигателях с *внутренним смесеобразованием* величина зоны образования NO обусловлена, во-первых, размерами фронта пламени F_d (см. рис. 2.10, в), который, в свою очередь, зависит от площади топливного факела, т.е. от величины цикловой подачи топлива. А во-вторых, зона образования NO в сечении, перпендикулярном поверхности F_d , ограничена значением температуры продуктов сгорания выше 2000 К. Таким образом, *эффективный объем образования NO* – это объем зоны продуктов сгорания, обусловленный приведенной поверхностью диффузионного фронта пламени F_d (идентифицируемой с величиной изостехиометрической поверхности) и толщиной зоны температур L , при которой возможно протекание реакции окисления азота воздуха остаточным кислородом, содержащимся в продуктах сгорания (рис. 3.11).

Образовавшийся NO находится в зоне продуктов сгорания, для которой характерно поле концентрации кислорода. Соответствен-

но разложение NO зависит как от концентрации O_2 , так и от интенсивности охлаждения продуктов сгорания. Причем последнее определяется положением продуктов сгорания относительно диффузионного фронта пламени, а также процессом сжатия – расширения.

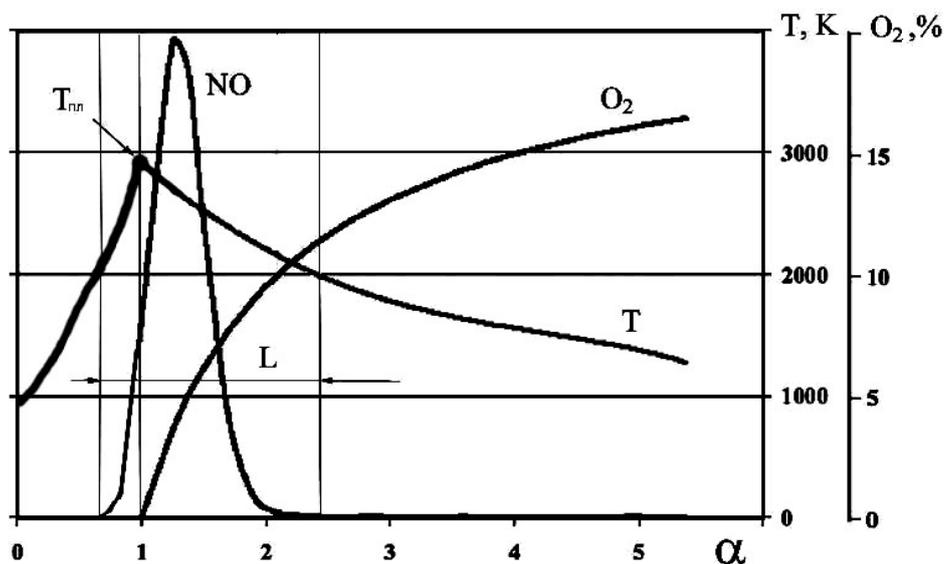


Рис. 3.11. Поля оксида азота NO, кислорода O_2 и температуры продуктов сгорания T в сечении, перпендикулярном поверхности диффузионного фронта пламени F_d (согласно рис. 2.10). Обозначения: $T_{пл}$ – температура во фронте пламени, L – ширина зоны, в которой возможно протекание реакций образования и разложения NO

В ДВС с внутренним смесеобразованием часть топлива, перемешанного с окислителем за период задержки воспламенения, сгорает по механизму, присущему для ДВС с внешним смесеобразованием, а остальная часть топлива – по мере поступления во фронт пламени. Соотношение этих частей топлива зависит от ряда конструктивно-регулируемых 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 NO в продуктах сгорания, а соответственно и в отработавших газах. Связано это с тем, что время сгорания топлива в ДВС с внешним смесеобразованием мень-

ше, 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 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 NO с ОГ в этих двигателях будет меньше, чем в ДВС с внешним смесеобразованием, что и наблюдается на практике (см. табл. 1.2).

§ 5. Дисперсные частицы

5.1. Состав дисперсных частиц

Еще один вид загрязнителей – это так называемые *дисперсные частицы (PM)*. Дисперсными они называются по той причине, что в отличие от газообразных веществ имеют видимый геометрический размер. Таким образом, речь может идти о веществах, находящихся как в жидком, так и твердом агрегатных состояниях.

Дисперсные частицы могут либо непосредственно поступать в воздух (это *первичные PM*), либо образовываться в воздухе при взаимодействии различных веществ между собой (это *вторичные PM*). Образование первичных *PM* обуславливается, с одной стороны, *антропогенным фактором*: транспортные средства, промышленные станции по выработке электроэнергии и тепла, предприятия по выпуску цемента, открытые карьеры по добыче железной руды и т.д., а с другой – естественным: споры и пыльца растений и пыль, поднимаемые в воздух ветром и т.д. [35].

Согласно определению, данному в международных стандартах по оценке экологического уровня двигателей с воспламенением от сжатия, дисперсные частицы – это все твердые и жидкие вещества, присутствующие в смеси отработавших газов и воздуха при температуре смеси не более 52 °С.

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

Жидкая часть *PM* представлена частью суммарных углеводородов с углеродным числом от C_5 до C_{17} , а также парами серной кислоты.

Вода в состав дисперсных частиц не входит.

В Германии согласно государственным стандартам принято, что дисперсные частицы, содержащиеся в ОГ дизелей, представляют собой *элементарный углерод* – сажу (в отличие от *органического углерода*: углерода, входящего в состав молекул, например углеводородов). При этом считается, что степень вредности твердых и жидких веществ различна, поэтому их нельзя объединять. Тем более что часть веществ (углеводороды с углеродным числом от C_5 и выше), находясь в газообразном состоянии, входят в состав суммарных углеводородов и нормируются отдельно.

В отличие от большинства загрязняющих веществ, которые представляют собой простые химические соединения, дисперсные частицы отличаются широким химическим составом и различными физическими характеристиками.

Дисперсные частицы условно делятся на две категории: 1) *непосредственно образованные* частицы в процессе горения, а также вследствие химических превращений газообразных веществ в твердые; 2) *продукты коагуляции* (укрупнения) более мелких, а также адсорбции газообразных соединений на них – *коагулированные частицы* [12, 21, 25...29, 34].

Непосредственно образованные разделяют на две группы: 1) *зародышевые (ядерные)* с аэродинамическим диаметром до 50 нм; 2) *ультрамелкие* размером 50...100 нм. Продукты коагуляции также делят на две группы: 1) *мелкие* размером 100...2500 нм (или 0,1...2,5 мкм), к этой группе относят и твердые сульфаты; 2) *крупные* – от 2,5 до 10 мкм. При этом крупные *PM* могут в силу ряда обстоятельств образовываться как отдельные частицы, а не в результате коагуляции. Коагулированные частицы часто распадаются на более мелкие составляющие (рис. 3.12).

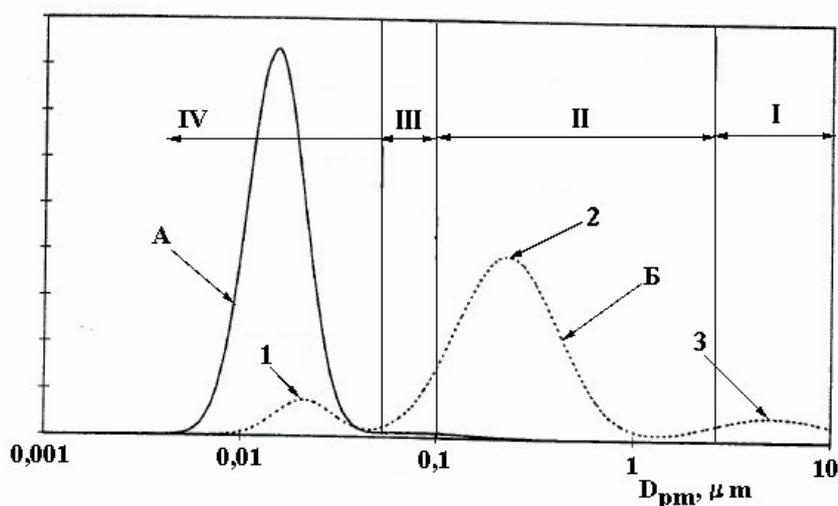


Рис. 3.12. Характер распределения дисперсных частиц в ОГ ДВС. Обозначения: А и Б – распределение частиц по количеству и массе; IV...I – категории частиц: зародышевые, ультрамелкие, мелкие и крупные; 1...3 – группы частиц: зародышевые, коагулированные, крупные

Дисперсные частицы, имеющие аэродинамический диаметр не более 2,5 мкм, обозначают $PM_{2,5}$. Частицы размером 2,5...10 мкм обозначают PM_{10} .

Содержащиеся в отработавших газах дисперсные частицы могут быть как *однородными* (все частицы почти одинакового размера), так и *неоднородными* (частицы имеют большой спектр размеров). Указанная особенность может отражаться в *модальности дисперсности* – одномодальное и бимодальное распределения (рис. 3.13).

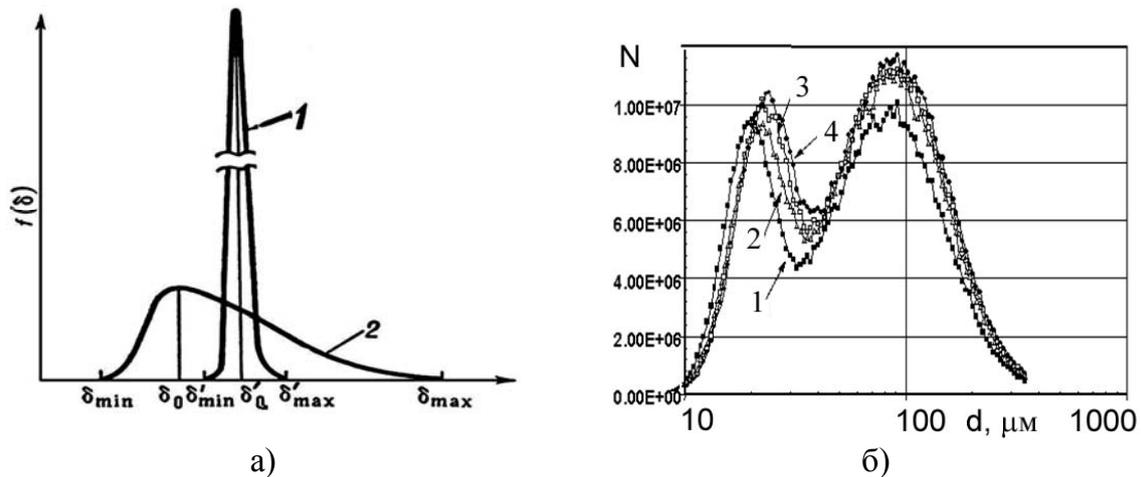


Рис. 3.13. Характер а) однородности и б) бимодальности дисперсных частиц, содержащихся в ОГ. Обозначения: 1 – однородное распределение; 2 – неоднородное распределение. Модальность дана при различной температуре ОГ (по оси абсцисс – аэродинамический диаметр PM , по оси ординат – количество PM в 1 см^3): 1 – $372 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $286 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $190 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $70 \text{ }^\circ\text{C}$

5.2. Образование твердых сульфатов

Особенности образования тяжелых углеводородов и сажи, которые входят в состав PM , были рассмотрены выше (см. § 1 и 2 настоящей главы). Особенности образования твердых сульфатов рассмотрены в настоящем разделе.

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



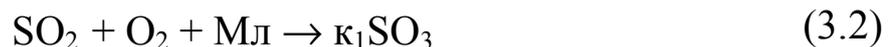
где SO_2 и SO_3 – сернистый и серный ангидриды, H_2SO_4 – серная кислота, Me – металл, MSO_4 – соль серной кислоты.

Особенности протекания указанных стадий следующие:

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



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



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



Реакция 3.1 идет в КС в условиях высоких температур продуктов сгорания и приводит к образованию сернистого ангидрида SO_2 . Реакция 3.2 окисления SO_2 в SO_3 , т.е. приводящая к образованию серного ангидрида SO_3 , начинается в КС, но наиболее интенсивно

идет при понижении температуры в потоке ОГ в выпускном трубопроводе.

В этой реакции коэффициент k_1 – это *коэффициент конверсии* SO_2 в SO_3 ; его значение определяется значениями температуры реакции и концентрации кислорода (рис. 3.14).

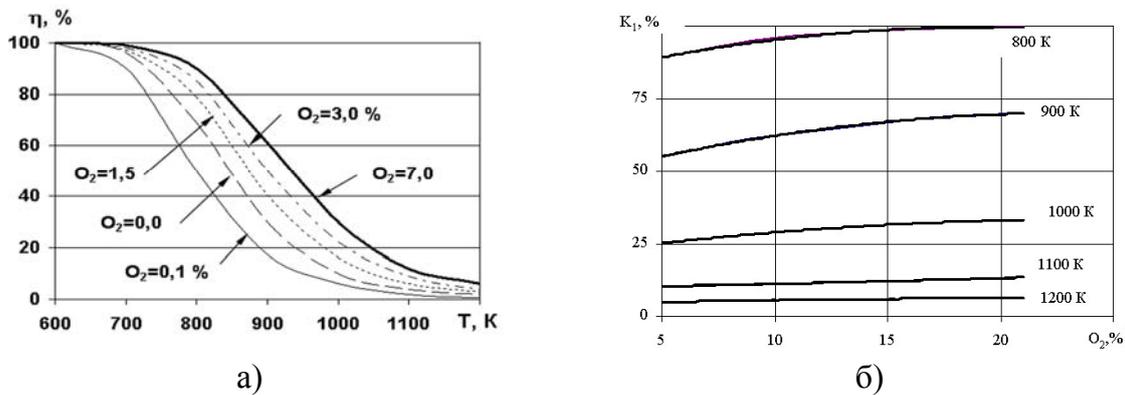


Рис. 3.14. Зависимость степени конверсии сернистого ангидрида SO_2 в серный ангидрид SO_3 от а) температуры реакции T и б) концентрации кислорода O_2

Чем выше концентрация O_2 , тем больше значение коэффициента конверсии k_1 при одинаковой температуре ОГ; чем выше значение температуры, тем меньшее количество SO_2 окисляется до SO_3 .

Скорость протекания указанной реакция невысокая, так как эта реакция тримолекулярная, т.е. идущая через взаимодействие SO_2 не только с O_2 , но любой третьей молекулой (Мл). Но для потока ОГ значительную роль дополнительно играет фактор времени: при высоких скоростях потока ОГ в системе выпуска ДВС температура ОГ быстро падает, что приводит к “закалке”, т.е. текущая концентрация продуктов реакции не успевает следить за изменением температуры. Поэтому можно принять, что реакция конверсии прекращается при максимальных температурах ОГ при их выходе из цилиндра двигателя. При температуре ОГ менее 1200 К и концентрации кислорода, соответствующей составу ОГ двигателя с внешним смесеобразованием, коэффициент $k_1 \approx 0,07$ (см. рис. 3.14, а). Для условий горения в дизеле содержание O_2 в ОГ находится в пределах 5,0...18,0 %; соответственно значение $k_1 \approx 0,07...0,10$.

Реакция 3.3 – взаимодействие серного ангидрида с парами воды (последние – результат сгорания водорода топлива) – приводит к образованию серной кислоты H_2SO_4 . Однако серная кислота очень *гигроскопична* – одна весовая часть кислоты может присоединить к себе до 10 весовых частей воды. Соответственно в указанной реакции коэффициент k_2 – это *коэффициент гидратации*, который может изменяться в пределах 5,0...10,0. Для дизелей, не оснащенных каталитическими нейтрализаторами, наиболее вероятное значение коэффициентов $k_2 \approx 7,5$, а с каталитическими нейтрализаторами – 0,60...0,90.

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

Образование твердых сульфатов MSO_4 происходит по схеме:
 - при температуре менее $140^\circ C$



Здесь Me – это металл – либо Ba, либо Ca.

Значение коэффициента *полноты реакции* $k_3 \approx 0,3$.

Таким образом, количество образующихся твердых сульфатов при горении топлива в ДВС зависит от содержания серы S в топливе, степени k_1 конверсии SO_2 в SO_3 , степени k_2 гидратации H_2SO_4 и степени k_3 полноты реакции H_2SO_4 с Ba и/или Ca, содержащимися в моющих присадках к маслам. Соответственно изменение концентрации продуктов сгорания серы, в том числе и MSO_4 , в ОГ пропорционально часовому расходу топлива G_T (рис. 3.15).

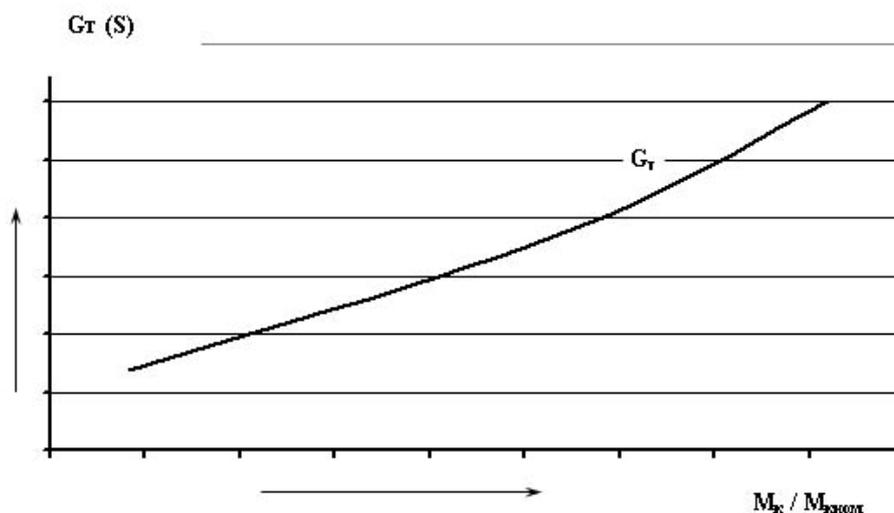


Рис. 3.15. Характерная зависимость концентрации соединений серы в отработавших газах дизелей по нагрузке

§ 6. Диоксид углерода

Образование диоксида углерода CO_2 является следствием окисления (т.е. сгорания) углерода С, присутствующего в молекуле углеводородного топлива. При полном сгорании 1 кг углерода образуется 3,67 кг CO_2 (см. § 3 гл. 2); концентрация CO_2 в ОГ дизелей находится в пределах 1,0...10,0 %, а в ДВС с принудительным воспламенением – 2,0...12,0 % (см. табл. 1.2).

В наиболее распространенных видах энергоносителей – дизельном топливе и бензине – содержание углерода составляет 86...87 % от массы топлива, в природном и нефтяном газах – 75...82 %.

Значение эмиссии CO_2 с отработавшими газами пропорционально расходу топлива.

Контрольные вопросы

1. Причины и источники появления неполностью сгоревших углеводородов топлива и масла в двигателях с внешним смесеобразованием.
2. Причины и источники появления неполностью сгоревших углеводородов топлива и масла в двигателях с внутренним смесеобразованием.

3. Причины и источники появления оксида углерода в двигателях с внешним смесеобразованием.
4. Причины и источники появления сажи в двигателях с внешним смесеобразованием.
5. Причины и источники появления сажи в двигателях с внутренним смесеобразованием.
6. Причины и источники появления оксидов азота в двигателях с внутренним смесеобразованием.
7. Влияние процесса сжатия – расширения и Махэ-эффекта на образование оксида азота.
8. Причины закалки оксида азота при горении топлив в дизелях.
9. Характеристики дисперсных частиц.
10. Причины и источники появления дисперсных частиц в двигателях с внутренним смесеобразованием.
11. Механизм образования твердых сульфатов при горении топлив в дизелях.
12. Предельно допустимая концентрация вредных веществ.
13. Причины и источники появления диоксида углерода в двигателях с внешним смесеобразованием.
14. Характерные зависимости содержания вредных веществ в отработавших газах ДВС с принудительным воспламенением (нарисовать и объяснить).
15. Характерные зависимости содержания вредных веществ в отработавших газах дизелей (нарисовать и объяснить).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности процесса горения топлив в поршневых двигателях внутреннего сгорания, в первую очередь, обуславливаются типом образования топливо-воздушной смеси: предварительное (внешнее) – до момента попадания смеси в цилиндр двигателя – или же внутреннее – непосредственно в цилиндре двигателя. Это определяет соотношение скоростей образования и выгорания смеси: при горении предварительно перемешанных топлива и окислителя скорость выгорания лимитируется скоростью химических реакций (кинетикой), а при горении предварительно неперемешанных реагентов процесс лимитируется физическими процессами – смешением реагентов (макросмешением и молекулярной диффузией).

На указанные особенности горения накладывается существенное влияние фактора изменения объема камеры сгорания (вследствие перемещения поршня в цилиндре двигателя, приводящего к ускоренному охлаждению реакционного объема из-за падения давления).

Характер воспламенения смеси (электрической искрой, открытым пламенем, накаливаемой поверхностью или за счет сжатия) играет второстепенную роль.

Учет вышеперечисленных особенностей процессов горения топливо-воздушной смеси и образования вредных веществ необходим при разработке мероприятий по улучшению экологических показателей двигателей.

Библиографический список

1. **Басевич, В.Я.** Углеводороды $C_1 - C_3$ в выхлопе ДВС / В.Я. Басевич, В.С. Исамухамедов, В.П. Карпов // Химическая физика. – 1992. – Т. 11. – № 11. – С. 1575 – 1579. – ISSN 0207-401X.
2. **Бурико, Ю.Я.** О возможном механизме образования окислов азота при турбулентном диффузионном горении / Ю.Я. Бурико, В.Р. Кузнецов // Физика горения и взрыва. – 1978. – № 3. – С. 32 – 42.
3. **Воинов, А.Н.** Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А.Н. Воинов. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 31 мая 2003 г.). – URL: [http:// www.yatagan.ru/projekt/GN/index.php](http://www.yatagan.ru/projekt/GN/index.php) (дата обращения: 29.11.2009).
5. **Горбунов, В.В.** Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. – М. : Изд-во РУДН, 1998. – 214 с. – ISBN 5-209-00912-2.
6. **Дубовкин, Н.Ф.** Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н.Ф. Дубовкин. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
7. **Звонов, В.А.** Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. – М. : Машиностроение, 1973. – 200 с.
8. **Зельдович, Я.Б.** Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – М. – Л. : Изд-во АН СССР, 1947. – 147 с.
9. **Зельдович, Я.Б.** Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М. : Наука, 1980. – 478 с.
10. **Квасничкова, Д.** Схемы по экологии и методическая разработка к ним / Д. Квасничкова, В. Калина ; пер. с чеш. – М. : Устойчивый мир, 2001. – 78 с. – ISBN 5-93177-011-9.
11. **Кондратьев, К.Я.** Климат Земли и "Протокол Киото" / К. Я. Кондратьев, К.С. Демирчан // Вестник РАН. – Т. 71. – № 11. – 2001. – С. 1002...1009. – ISSN 0002-3442.
12. **Кульчицкий, А.Р.** Расчетно-экспериментальное определение выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей /

А.Р. Кульчицкий // Двигателестроение. – 2005. – № 4. – С. 39 – 44. – ISSN 0202-1633.

13. **Кульчицкий, А.Р.** Транспорт и “парниковые газы” / А.Р. Кульчицкий, В.В. Эфрос // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 6. – С. 38 – 42. – ISSN 0005-2337.

14. **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. – 376 с. – ISBN 5-7038-1993-8.

15. **Махов, В.З.** Макрокинетические основы моделирования процесса образования окиси азота в дизеле / В.З. Махов, С.В. Гусаков, А.Р. Кульчицкий // Рабочие процессы автотракторных ДВС : сб. науч. тр. – М. : МАДИ, 1982. – С. 43.

16. **Парсаданов, И.В.** Повышение качества дизелей на основе топливно-экологического критерия / И.В. Парсаданов. – Харьков : Издат. центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с. – ISBN 966-593-319-1.

17. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (Нью-Йорк, 9 мая, 1992 г.) – URL : www.pravoteka.ru/pst/102/50732.html (дата обращения: 29.11.2009).

18. Техническая энциклопедия / под ред. Л.К. Мартенса. – Изд. 2-е. – М. : Гостехиздат ОГИЗ РСФСР, 1937. – Т. 4. – С. 231 – 234.

19. **Филипосянц, Т.Р.** К вопросу об ускоренных методах контроля и доводки дизелей по экологическим параметрам / Т.Р. Филипосянц, А.Г. Иванов // Экология двигателя и автомобиля : сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С. 19 – 25. – ISSN 0135-3152.

20. **Alkidas, A.C.** Relationship between smoke measurements and particulate measurements / A.C. Alkidas // SAE Paper 840412. – 9 p.

21. **Altenkirch, R.A.** Nitric Oxide Formation Around Droplets Burning at Elevated Pressure / R.A. Altenkirch et al. // Combustion Science and Technology. – 1972. – Vol. 5. – P. 147 – 154.

22. **Bowman, C.T.** Investigation of Nitric Oxide Formation Kinetics in Combustion Process: The Hydrogen-Oxygen-Nitrogen Reaction / C.T. Bowman // Combustion Science and Technology, 1971, Vol.3. – P. 37 – 45.

23. **Bracco, F.V.** Nitric Oxide Formation in Droplets Diffusion Flames / F.V. Bracco / 14-th Symposium on Combustion, Pittsburg, 1973, Proceedings. – P. 831 – 842.

24. Diesel Particulate Matter Sampling Methods: Statistical Comparison / University of Minnesota, November 2000. - 52 p.
25. Diesel Exhaust Particle Size: Measurement Issues and Trends / I. Abdul-Khalek [et al.] // SAE Paper 980525. – 16 p.
26. Direct Injection Gasoline Engines - Combustion and Design. / J. Geiger, M. Grigo, O. Lang, P. Hupperich // SAE Paper 010170. – 8 p.
27. **Greeves, G.** Origins of Diesel Particulate Mass Emissions / G. Greeves, J.T. Wang // SAE Transactions. – Vol. 90, 1981. – P. 1161 – 1172.
28. **Hardenberg, H.** Grenzen der Rußmassbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ. – 1987. – № 2. – S. 51 – 54.
29. **Haynes, B.S.** The Role of Fuel Nitrogen in Nitric Oxide Formation / B.S. Haynes, D. Iverach, N.Y. Kirtov // Process and Chemical Engineering, April 1974. – P. 25 – 27.
30. **Heinrich, G.** Spektrometrisches meßverfahren in Diesemotor / G. Heinrich [et al.] // MTZ. – 1978. – 39.– № 9. – P. 380 – 385.
31. **Hiroyasu, H.** Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines / H. Hiroyasu, T. Kadota // SAE Paper 760129. – 14 p.
32. Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change, 1997. – URL: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php (дата обращения: 20.12.2009).
33. **Muntean, G.G.** A theoretical model for the correlation of smoke number to dry particulate concentration in diesel exhaust / G.G. Muntean // SAE Paper 010515. – 9 p.
34. **Muntean, G. G.** The State of the Sciences in Diesel Particulate Control / G.G. Muntean // Pacific Northwest National Laboratory, 2005, Presentation.
35. **Murayama, Y.** A Mathematical Model on Nitric Oxide Formation in Diesel Engines / Y. Murayama [et al.] // Bulletin of the ISME, January 1979. – Vol. 22. – P. 79 – 85.
36. **Nightingale, D.R.** A Fundamental Investigation into the Problem of NO Formation in Diesel Engines / D.R. Nightingale // SAE Transaction, 1975. – Vol. 84/3, 750848. – P. 2196 – 2212.

37. **Portrait, L.M.** La Formation de L'oxide azotique dans les flamesdiffusion de gaz naturel / L.M.Portrait [et al.] // Inst.francais due petrole revue, 1974. – V. 29. – № 4. – P. 553 – 570.

38. **Rao, P.S.** Prediction of Nitric Oxide Emission From Diesel Engines / P.S. Rao [et al.] // Indian Journal of Technology, 1978. – Vol. 16, may. – P. 177 – 183.

39. **Shahed, S.M.** A Preliminary Model For The Formation of Nitric Oxide in Direct Injection Diesel Engines and Its Application in Parametric Studies / S.M. Shahed [et al.] // SAE Paper 730083. – 12 p.

40. **Sijm, J.P.M.** Kyoto Mechanisms. The Role of Joint Implementation, the Clean Development Mechanism and Emissions Trading in Reducing Greenhouse Gas Emissions / J.P.M. Sijm [et al.]. – 2000. – 54 p.

41. **Tsrushima, T.** A Study of Unburnt Hydrocarbon Emission in Small DI Diesel Engines / T. Tsrushima, L. Zhang, Y. Ishii // SAE Paper 010512. – 10 p.

42. The Particle Pollution Report 2003 / US EPA-454-R-04-002, December 2004. – 27 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Характер воздействия вредных веществ на человека

№ п/п	Характеристика воздействия	Концентрация (% объемный)
Оксиды азота		
1	Абсолютный порог воздействия	0,00001
2	Порог восприятия запаха	0,0001...0,0003
3	Порог раздражения слизистых оболочек носа и глаз	0,0013
4	Образование метгемоглобина	0,001...0,002
5	Отек легких	0,004...0,008
Оксид углерода		
6	Безвредно	0,0016
7	Хроническое отравление при длительном пребывании	0,01
8	Слабое отравление через 1 час	0,05
9	Потеря сознания через несколько вдохов	1,0
Оксиды серы		
10	Раздражение глаз, кашель	0,0017
11	Раздражение в горле	0,0007...0,001
12	Отравление через 3 мин	0,004
13	Отравление через 1 мин	0,01
Формальдегид		
14	Безвредно	0,00037
15	Порог восприятия запаха	0,0002
16	Легкое раздражение дыхательных путей и слизистых оболочек носа и глаз	0,007
17	Осложнение	0,018
18	Сильное раздражение	0,18
Акролеин		
19	Безвредно	0,00008
20	Трудно переносимо	0,0005
21	Порог восприятия запаха	0,004
22	Непереносимо	0,002
23	Приводит к смерти через 10 мин	0,014

Таблица П2

Расчет удельного (на один год) выброса и поглощения парниковых газов некоторыми странами-участницами РКИК

Страна	Квота ПГ тыс. т	Доля страны %	S _{страны} тыс. кв. км	Населе- ние млн чел.	S _{лесов} %	Удельный выброс ПГ**		Погло- щение ПГ лесаами тыс. т	Отноше- ние по- глощения к квоте
						т / \$1 ВВП	кг / кв. км		
Всего	13728	100*	-	-	-	-	-	-	-
США	4956	36,1	9363	290,3	30	0,6	529	2808	0,57
Россия	2389	17,4	17075	144,5	46	8,3	140	7854	3,29
Япония	1167	8,5	370	127,2	67	2,8	3154	248	0,21
ФРГ	1016	7,4	356	82,4	31	0,6	2854	110	0,11
Британия	590	4,3	244	60,1	10	0,6	2419	24	0,04
Канада	453	3,3	9976	32,2	54	0,6	45	5387	11,89
Италия	426	3,1	301	58	23	0,6	1414	69	0,16
Польша	412	3,0	312	38	28	8,3	1320	88	0,21
Франция	371	2,7	551	60,2	27	0,6	673	149	0,40
Австралия	288	2,1	7687	19,7	19	1,8	38	1461	5,07
Нидерланды	165	1,2	41	16,2	8	0,6	4018	3	0,02
Бельгия	110	0,8	30,5	10,2	21	0,6	3601	6	0,05
Австрия	55	0,4	84	7,3	32	0,6	654	26	0,47
Швеция	55	0,4	450	8,9	68	0,6	122	305	5,45
Финляндия	55	0,4	338	5,2	76	0,6	162	257	4,67

Обозначения: * – в таблице выборочно приведены сведения для 15 из 34 стран-участниц совещания в Киото в 1997 г., на долю которых приходится более 90 % квотированных выбросов ПГ [17, 33]; ** – данные расчета удельного выброса, т / \$1 ВВП, приведены в среднем для четырех групп государств [41].

Таблица ПЗ

Содержание химических элементов в основных видах топлив (в процентах по массе)

Топливо	Углерод С	Водород Н	Кислород О	Азот N	Сера S	Тепловой эквивалент*	
						угольный	нефтяной
Дерево	51,0	6,1	42,3	0,6	0	0,43	0,30
Торф	51,0...58,0	5,5...6,0	29,5...33,5	2,2...2,5	0,2...0,3	0,23...0,73	0,16...0,51
Сланцы	60,0...75,0	7,0...10,0	12,0...17,0	0,3...1,2	4,0...13,0	0,20...0,40	0,14...0,28
Бурый уголь	64,0...78,0	3,8...6,3	15,0...26,0	0,6...1,6	0,3...6,0	0,39...0,49	0,27...0,34
Каменный уголь	75,0...90,0	4,0...6,0	2,0...13,0	1,0...2,7	0,5...6,0	0,82...1,04	0,57...0,73
Антрацит	93,0...94,0	2,0	1,0...2,0	1,0	2,0...3,0	0,86...1,03	0,60...0,72
Дизельное	86,5...87,0	12,6	0,4	0	Не больше 0,5	1,53	1,00
Бензин	85,0	15,0	0	0	Не больше 0,15	1,57	1,05
Керосин	85,0...86,0	14,0	0	0	Не больше 1,0	1,43	1,03
Масла растительные	~77,6	~11,5	~10,9	-	-	1,26...1,32	0,88...0,92
Мазут	85,0...88,0	11,0...12,0	До 0,2	Не больше 0,3	0,5...2,0	1,4	0,94...0,98
Природный газ	75,0	25,0	0	Не больше 0,3	0	1,71	1,20
Нефтяной газ	82,0	18,0	0	Не больше 0,5	Не больше 0,015	1,29	0,90
Ацетилен	92,3	7,7	-	-	-	1,94	1,36

Примечание. Тепловой эквивалент* – отношение низших теплотворностей данного и условного топлива. Теплотворность последнего 7000 ккал/кг = 29330 кДж/кг) для угольного эквивалента и 10000 ккал/кг = 41900 кДж/кг – нефтяного. Для газообразных топлив теплотворность условного топлива – 7000 ккал/м³ = 29330 кДж/м³.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	5
§ 1. Состав атмосферы.....	5
§ 2. Состав отработавших газов.....	7
2.1. Содержание веществ в воздухе и отработавших газах.....	7
2.2. Характер воздействия вредных веществ на человека.....	9
§ 3. Парниковые газы.....	13
3.1. Парниковый эффект.....	13
3.2. Киотский протокол.....	15
Контрольные вопросы.....	19
Глава 2. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВ В ПОРШНЕВЫХ ДВС	21
§ 1. Проблемы совершенствования экологических показателей процессов горения.....	21
§ 2. Условия воспламенения.....	22
§ 3. Особенности горения топлив в поршневых ДВС.....	24
3.1. Тип смесеобразования.....	24
3.2. Способ воспламенения смеси.....	26
3.3. Развитие процесса горения в ДВС с внешним смесеобразованием и принудительным воспламенением.....	29
3.4. Развитие процесса горения в ДВС с воспламенением от сжатия.....	33
§ 4. Состав продуктов горения.....	38
Контрольные вопросы.....	44
Глава 3. ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ	45
§ 1. Углеводороды.....	45
1.1. Смазочное масло.....	45
1.2. Внешнее смесеобразование.....	46
1.3. Внутреннее смесеобразование.....	48
§ 2. Сажа.....	52
§ 3. Оксид углерода.....	56

§ 4. Оксиды азота.....	57
§ 5. Дисперсные частицы.....	63
5.1. Состав дисперсных частиц.....	63
5.2. Образование твердых сульфатов.....	66
§ 6. Диоксид углерода.....	69
Контрольные вопросы.....	69
Заключение.....	71
Библиографический список.....	72
Приложение.....	76

Учебное издание

КУЛЬЧИЦКИЙ Алексей Рэмович

ТОКСИЧНОСТЬ ПОРШНЕВЫХ ДВС.
ОБРАЗОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВ

Учебное пособие

Подписано в печать 27.01.10.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 4,65. Тираж 100 экз.
Заказ
Издательство
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.