



## **Тема 7. Экологическая безопасность транспортных энергетических установок**

### **Учебные вопросы:**

- 1. Экологические проблемы, связанные с транспортными энергетическими установками.**
- 2. Поршневые ДВС и окружающая среда.**
- 3. Газотурбинные двигатели и окружающая среда.**
- 4. Двигатели Стирлинга и окружающая среда.**
- 5. Реактивные, ракетные двигатели и окружающая среда.**



**К экологическим показателям** тепловых двигателей следует отнести такие, которые характеризуют *прямое и косвенное* воздействие на окружающую среду. В соответствии со вторым законом термодинамики эти двигатели всегда будут выбрасывать теплоту в окружающее пространство. Чем выше КПД двигателя, тем лучше его топливная экономичность, тем выше его экологические качества. В любых тепловых двигателях имеет место процесс сгорания топлива. В большинстве случаев при этом в качестве окислителя используется кислород воздуха, а химические превращения веществ при сгорании связаны с образованием вредных веществ, выбрасываемых затем в окружающую среду. Кроме того, тепловой двигатель выбрасывает в окружающее пространство механическую энергию - акустическое излучение (вибрации и шум). Таким образом, совокупность показателей, характеризующих тепловое и вещественное взаимодействие теплового двигателя с окружающей средой; акустическое излучение (шум), вибрации; количества конструкционных и эксплуатационных материалов, расходуемых при изготовлении и использовании этих двигателей; количества энергии, затрачиваемые при производстве и использовании двигателей и материалов, следует понимать как *определяющую качество экологической чистоты тепловых двигателей транспортных средств.*

Прежде всего, следует отметить техногенное воздействие на окружающую среду при создании двигателя. Начало его имеет место при разведке и добыче полезных ископаемых, идущих на изготовление конструкционных и эксплуатационных материалов, затем собственно производство двигателей. Технологические процессы изготовления также сопровождаются вредными выбросами, которые концентрируются главным образом в пределах заводских территорий. Оценка экологических качеств технологических процессов изготовления (литье,ковка, механическая обработка, сборка) и их сравнительный анализ - важная самостоятельная задача, здесь же ограничимся самой общей характеристикой, каковой является величина затрат энергии, которые имеют место при производстве единицы материала (чугуна, стали, бензина) или собственно двигателя. Материалы следующего слайда позволяют понять, какова мера воздействия на окружающую среду при производстве материалов для изготовления и обеспечения использования, например, поршневого двигателя внутреннего сгорания.

**Воздействие на окружающую среду при производстве материалов  
для изготовления и обеспечения использования поршневого ДВС  
(выбросы приведены на единицу массы материалы)**

Наименование показателя	Конструкционные материалы						Эксплуатационные материалы		
	сталь, чугун	алюминий	медь	свинец, сурьма	пластмассы	резина	бензин	дизельное топливо	моторное масло
<b>Выбросы вредных веществ г/кг:</b>									
аэрозоли	548,6	3,82	9,24	9,12	4,85	5523,59	3,59	2,53	35,9
CO <sub>2</sub>	1898,7	1705,3	764,4	676,2	3550	8607,02	695,5	489,6	6955
CO	1542,8	15,08	83,53	69,45	8,75	2471,2	15,43	10,86	154,3
NO <sub>x</sub>	3,46	22,8	10,22	9,04	3,7	0,69	1,9	1,34	19,0
CH	8,61	0,17	0,08	0,07	85,7	152,01	8,92	6,28	89,2
SO	22,15	120,06	1122	194,0	61,0	437,68	21,81	15,36	218,1
<b>Потребление O<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/кг</b>	2,59	2,9	1,3	1,15	5,0	14,7	1,498	1,054	14,981
<b>Энергозатраты, кВт·ч/кг</b>	15,15	58,0	26,0	23,0	33,7	40,99	4,96	3,49	49,6

В процессе работы тепловые двигатели также оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Не будет грубой ошибкой считать, что вся тепловая энергия сжигаемого в рассматриваемых двигателях в конце концов выделяется в окружающую среду, что приводит к её перегреву. Повышение температуры приводит к увеличению темпов опустынивания, таянию накопленных на Земле льдов и подъему уровня Мирового океана. Темпы опустынивания в настоящее время составляют: 6 млн. га в год, или 11 га в минуту.

Одновременно расходуется кислород воздуха, а также выбрасываются отработавшие газы, большую долю в которых составляют токсичные вещества.

***Выделение токсичных веществ в атмосферу от различных источников (млн. т.)  
(в скобках приведено относительное содержание каждого компонента  
в % от его общего количества)***

<i>Источник загрязнения</i>	<i>CO</i>	<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>SO<sub>x</sub></i>	<i>СН</i>	<i>Твердые частицы</i>	<i>Итого</i>
Транспорт	69,1 (80,9)	9,1 (44,2)	0,9 (3,8)	7,8 (35,8)	1,4 (17,9)	88,3 (55,4)
Промышленные и энергетические установки	5,8 (6,8)	0,7 (3,4)	3,8 (16,0)	10,8 (49,5)	3,7 (47,4)	24,8 (15,6)
Стационарные отопительные установки	2,1 (2,5)	10,6 (52,0)	19,0 (80,2)	0,2 (0,9)	1,4 (17,9)	33,3 (20,9)
Прочие (сжигание отходов и др.)	8,4 (9,8)	0,2 (1,0)	менее 100 тыс. т	3,0 (13,8)	1,3 (6,7)	13,0 (8,2)
<b>В с е г о</b>	<b>85,4</b>	<b>20,6</b>	<b>23,7</b>	<b>21,8</b>	<b>7,8</b>	<b>159,4</b>

**Выделение вредных веществ в атмосферу в результате деятельности транспорта (млн. т.)  
(в скобках приведено относительное содержание каждого компонента  
в % от его общего количества)**

<i>Источники загрязнений</i>	<i>CO</i>	<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>SO<sub>x</sub></i>	<i>C<sub>x</sub>H<sub>y</sub></i>	<i>Твердые частиц ы</i>	<i>Итого</i>
Наземный транспорт	81,5 (97,3)	9,5 (96,4)	0,7 (0,5)	9,2 (83,6)	6,1 (17,0)	107,0 (75,7)
Воздушный транспорт	0,9 (1,1)	0,1 (1,0)	0,01 (1,1)	0,2 (1,8)	0,07 (0,2)	1,3 (0,9)
Водный транспорт	1,4 (1,7)	0,2 (2,0)	0,2 (2,2)	0,5 (4,5)	0,04 (0,1)	2,4 (1,7)
<b>В с е г о</b>	<b>83,8</b>	<b>9,8</b>	<b>0,9</b>	<b>9,9</b>	<b>6,2</b>	<b>110,4</b>

## 2. ПОРШНЕВЫЕ ДВС И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Основным источником загрязнения окружающей среды в мире и в городах России *является автомобильный транспорт*, количество которого непрерывно растет. Причём негативной особенностью является то, что вредные выбросы происходят в поверхностном слое земной атмосферы.

*Доля автотранспорта в загрязнении атмосферы токсичными веществами (%)*

<i>Токсичные компоненты</i>	<i>Доля автотранспорта в общем загрязнении</i>
Оксид углерода	93
Оксиды азота	46
Углеводороды	63
Оксиды серы	4
Сажа	8

## Основные компоненты отработавших газов автомобильных поршневых ДВС

Основные компоненты	Содержание, % по объему	
	Дизели	Двигатели с искровым зажиганием
<i>Азот</i>	76-78	74-77
<i>Кислород</i>	2-18	0,3-0,8
<i>Водород</i>	0,01-0,5	0,1-5,0
<i>Пары воды</i>	0,5-4,0	3,0-5,5
<i>Углекислый газ</i>	2,0-12,0	8,0-13,0
<b>Оксид углерода</b>	0,01-0,5	0,1-8,0
<b>Оксиды азота</b>	0,004-0,5	0,01-0,8
<b>Углеводороды (суммарно)</b>	0,009-0,5	0,2-3,0
<b>Сернистый ангидрит</b>	0,003-0,05	-
<b>Альдегиды</b>	0,001-0,009	0,0-0,2
<b>Сажа, г/м<sup>3</sup></b>	0,01-1,5	0,0-0,04
<b>Бенз(а)пирен, г/м<sup>3</sup></b>	0,0-10,0	0,0-20,0
<b>Свинец, г/м<sup>3</sup></b>	-	50-75

*Чёрным курсивом выделены нетоксичные компоненты.* Однако, следует иметь в виду, что с отработавшими газами в окружающую среду ежегодно попадает 1010 т углекислого газа. Всего же в атмосфере планеты содержится 2,3·10<sup>12</sup> тонн этого газа. Углекислый газ считают «парниковым» газом и доля его «вклада» в парниковый эффект составляет не менее половины от общего количества. Изменение климата в результате антропогенных выбросов парниковых газов ведет к крупномасштабным негативным последствиям практически во всех областях деятельности человека. Наиболее значительному потеплению подвержены высокие широты Земли, в которых расположена значительная часть территории России.

**Красным выделены токсичные компоненты.**

Масштабы загрязнения окружающей среды можно хорошо представить, учитывая, что, например, только при сгорании одной тонны бензина выбрасывается до 456 кг – CO, 23 кг – CH, 16 кг – NO<sub>x</sub>, 1,86 кг – SO<sub>2</sub> и 0,93 кг – альдегидов. При сгорании одной тонны дизельного топлива в биосферу выбрасывается до 21 кг – CO, 4 кг – CH, 18,8 кг – NO<sub>x</sub>, 0,78 кг – альдегидов.

Значимость отдельных компонентов (в порядке убывания) для общей токсичности отработавших газов с учётом действующих норм на предельно допустимые концентрации следующая: соединения свинца, оксиды азота, предельные ароматические углеводороды, оксид углерода и углеводороды. В соответствии с действующими в России нормами на предельно допустимые концентрации (ПДК) относительная токсичность ряда составляющих отработавшие газы располагается следующим образом: CO; NO<sub>x</sub>; CH; PbCH; C<sub>6</sub>H<sub>12</sub> (бенз-α-пирен) = 1 : 40 : 1,25 : 22000 : 1250000.

## Природа образования токсичных веществ в отработавших газах тепловых двигателей и их воздействие на организм человека

**Оксид углерода (CO).** Образование оксида углерода является следствием неполного окисления углерода, происходящего из-за недостатка кислорода, т.е. часть углерода окисляется в соответствии с реакцией  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ . Оксид углерода поступая в организм человека, снижает функцию кислородного питания, выполняемую кровью, так как поглощаемость CO кровью в 240 раз выше поглощаемости кислорода.

**Углеводороды (CH)** в отработавших газах содержатся в виде продуктов неполного разложения и окисления топлива, а также в парах топлива. Международным Агентством исследований по канцерогенезу (International Agency Research on Cancer) 16 углеводородов классифицированы как возможно канцерогенные для человека, а такие полициклические ароматические углеводороды, как бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен и дибенз(а)антрацен определены как безусловно канцерогены.

**Оксиды азота (NO<sub>x</sub>).** В обычных атмосферных условиях азот практически представляет собой инертный газ. Однако при высоких температурах он вступает в реакцию с кислородом, образуя оксид азота (NO) и небольшое количество диоксида азота (NO<sub>2</sub>). Оксиды азота раздражающе действуют на слизистые оболочки глаз, носа, остаются в легких в виде азотной и азотистых кислот, образующихся в результате взаимодействия NO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> с влагой верхних дыхательных путей. В результате фотохимических реакций на солнечном свете из оксида азота образуется диоксид азота, который вместе с углеводородами является причиной образования токсических туманов.

**Твердые частицы** в основном составляет сажа, частицы нагара и несгоревшего масла. В двигателях с искровым зажиганием сажа в отработавших газах присутствует только при нарушении нормального технического состояния системы топливопитания – при чрезмерном переобогащении горючей смеси. Дизели обладают повышенной склонностью к образованию сажи, что обусловлено применением в них способа внутреннего смесеобразования. Сама по себе сажа не токсична, но на ней осаждаются углеводороды, являющиеся канцерогенами.

# Стандарты РФ, регламентирующие вредные выбросы с отработавшими газами поршневых ДВС

**ОСТ 37.001.243-81** Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы измерений.

**ГОСТ Р 41.49-2011** (Правила ЕЭК ООН № 49) Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ.

**ГОСТ Р 41.83-2004** (Правила ЕЭК ООН № 83) Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей.

**ГОСТ Р 41.24-2003** (Правила ЕЭК ООН № 24) Единообразные предписания, касающиеся: I. Сертификации двигателей с воспламенением от сжатия в отношении дымности; II. Сертификации автотранспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, сертифицированных по типу конструкции; III. Сертификации автотранспортных средств с двигателями с воспламенением от сжатия в отношении дымности; IV. Измерения мощности двигателей.

**ГОСТ 17.2.2.01-84** Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений.

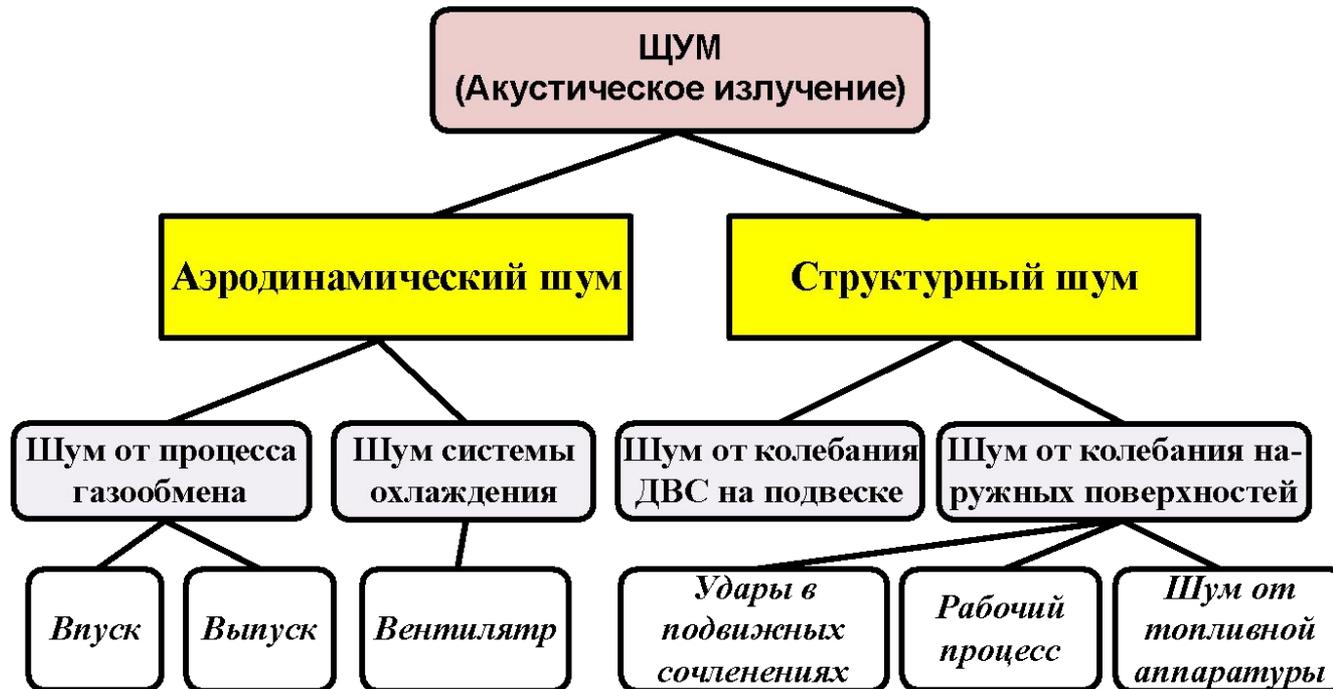
**ГОСТ 17.2.2.02-98** Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

**ГОСТ 17.2.2.05-97** Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

## Шум при работе поршневых ДВС

Поршневой ДВС является сложным источником шума (акустического излучения). Его звуковое поле подразделяют на аэродинамический (шум, образующийся при течении газа или обтекании тел потоком газа) и структурный (шумы, которые возникают в результате механического взаимодействия).

### Классификация источников шума поршневых ДВС по механизму образования



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

## Способы снижения токсичных выбросов

### Подавление эмиссии токсичных веществ в процессе сгорания топлива

- уменьшение образования продуктов неполного сгорания и частичного разложения топлива за счет обеспечения достаточной общей и локальной концентрации кислорода а также сокращения продолжительности (увеличения скорости) сгорания.
- уменьшение образования оксида азота путём снижения максимальных, средних и локальных температур продуктов сгорания .
- использованием систем рециркуляции отработавших газов.

### Снижение содержания токсичных веществ в отработавших газах вне рабочей полости (нейтрализация отработавших газов и их фильтрование).

### Использование топлив, не содержащих (или содержащих допустимый минимум) токсических веществ и не образующих таковых при сгорании

В качестве нетрадиционных видов моторных топлив могут применяться газообразные (метан, природный газ, водород, пропан, метанол, этаноли и их смеси), жидкие (спирты, бензол, каменноугольные смолы), синтетические жидкие топлива (продукты переработки сланцев, угля и другие).

Простейшей присадкой к топливу является вода. В случае применения водно-топливной эмульсии, за счет явления микро-взрыва частиц воды, распыление топлива улучшается, за счет этого его расход снижается на 4,5-7,5%.

### Оптимальные регулировки

## Пути снижения шума

### Пассивные способы

#### Реализуются в основном:

- применением капсул, акустически герметизирующих двигатель в подкапотном пространстве;
- использованием звукопоглощающих и звукоотражающих экранов, устанавливаемых в направлении распространения звуковых волн от двигателя к точкам измерения шума при его нормативной оценке.

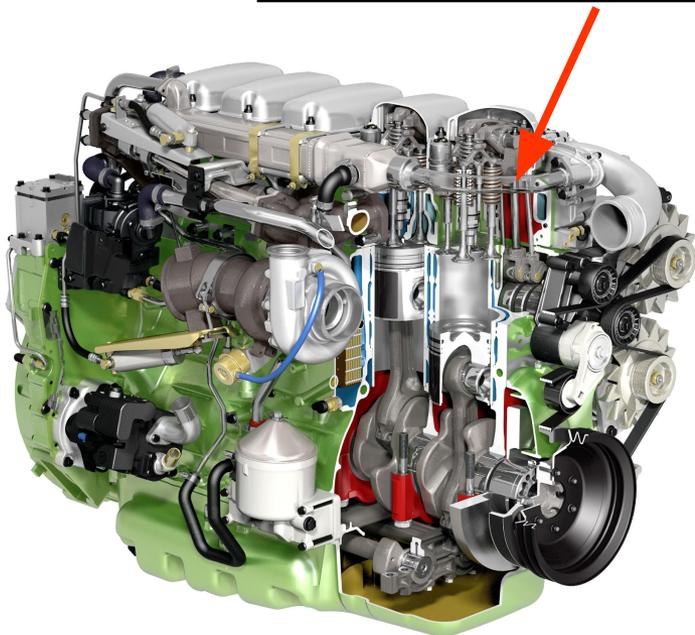
### Активные способы

#### Предполагают целенаправленные изменения

- 1 - характера процессов в ДВС, вызывающих шум данного происхождения;
- 2 - конструкции двигателя, обеспечивающей поглощение колебательной энергии и ограничивающей передачу энергии на наружные поверхности, а также интенсивность излучения

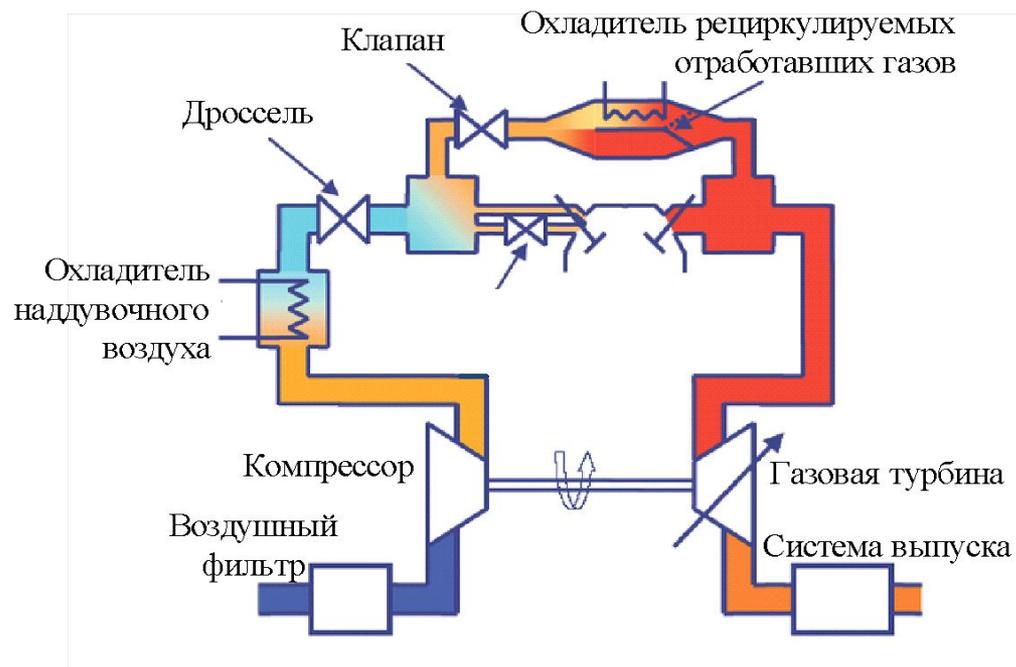
## Рециркуляция отработавших газов в поршневых ДВС

Перепуск отработавших газов из выпускного трубопровода во впускной



Дизель Scania 270 с системой рециркуляции отработавших газов

### Схема системы рециркуляции на примере двигателя с газотурбинным наддувом



# 3. ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Газотурбинные двигатели, как и любые тепловые двигатели, для производства полезной работы используют процессы химического окисления горючих элементов углеводородного топлива. По сравнению с поршневым ДВС ГТД являются экологически более «чистыми» двигателями. Так, например, содержание оксидов азота в выбрасываемых из них в атмосферу газов в 9,6 раза меньше, чем у бензиновых ДВС и в 2,1 – чем у дизелей; содержание несгоревших углеводородов в 9,8 и 15,6 соответственно, а оксидов азота – в 4, 2 и 4, 3 раза. Это объясняется тем, что в них, во-первых, количество воздуха, подаваемого в камеру сгорания, в 5–7 раз больше, чем это теоретически необходимо для полного сгорания 1 кг топлива, т.е. рабочим телом практически является горячий воздух (83 % по массе), а во вторых – продолжительность процесса сгорания в сотни раз продолжительнее, чем в поршневых ДВС. Тем не менее, в выбрасываемых в окружающую среду продуктах сгорания этих двигателей, естественно содержатся в основном те же вредные компоненты, что и в отработавших газах поршневых ДВС: оксиды углерода, оксиды азота, углеводороды и твердые частицы. Природа образования токсичных веществ в отработавших газах ГТД и их воздействие на организм человека аналогичным рассмотренным ранее при обсуждении этих вопросов в отношении поршневых ДВС.

## *Нормирование выбросов вредных веществ при работе газотурбинных двигателей*

Поскольку ГТД используются в наземных условиях (наземные транспортные машины, водный транспорт, трубопроводный транспорт) и в авиации, то стандарты на вредные выбросы различны для различных условий эксплуатации. Для наземных транспортных машин, судовых силовых установок и силовых установок, предназначенных для привода компрессоров в трубопроводном транспорте они соответствуют стандартам для поршневых ДВС, эксплуатируемых в этих условиях. Нормирование выбросов вредных веществ от авиационных ГТД базируется на эксплуатационных режимах, характерных для зоны аэропорта и определяемых условно как стандартный цикл взлётно-посадочных режимов. Этот цикл включает все операции, совершаемые самолётом от момента, когда он при заходе на посадку пересечет контрольную отметку высота до момента пересечения этой же отметки при наборе высоты после взлета. Стандарты определяют для различных классов двигателей максимально допустимые уровни выбросов CO, CH, NOx и твёрдых частиц (дыма).

## Способы уменьшения выбросов вредных веществ при работе ГТД

Поскольку стандарты определяют допустимые уровни выбросов четырех основных вредных веществ: CO, CH, NOx и твёрдых частиц (дыма), рассмотрим мероприятия, обеспечивающие выбросы именно этих компонентов.

Меры, обеспечивающие снижение выхода *оксида углерода*, сводятся к следующему:

1. Улучшение распыливания топлива с целью ускорения процесса испарения топлива и способствование созданию гомогенной горючей смеси.
2. Перераспределение воздуха по камере сгорания с тем, чтобы сделать величину коэффициента избытка воздуха ближе к оптимальной.
3. Увеличение объёма зоны горения и времени пребывания в ней.
4. Уменьшение расхода воздуха на плёночное охлаждение жаровой трубы.
5. Перепуск воздуха из компрессора на режимах малой мощности. При этом выход CO снижается благодаря увеличению соотношения топливо-воздух и температуры в зоне горения.
6. Переключение подвода топлива на меньшее число форсунок. Это снижает выход CO благодаря улучшению распыливания топлива и увеличению коэффициента избытка воздуха в зонах горения (за оставшимися форсунками).

Выброс *несгоревших углеводородов* определяют те же факторы, что и выброс CO. Проблема уменьшения выброса CH может быть решена теми же способами, что и проблема CO.

Для уменьшения выхода *оксидов азота* необходимо снизить температуру в зоне реакции. Рекомендуются следующие практические приёмы для снижения выбросов NOx из камер сгорания ГТД:

1. Добавление воздуха в зону горения для снижения температуры пламени
2. Организация «богатой» смеси в зоне горения. Избыток топлива, так же как и избыток воздуха снижает температуру пламени и, следовательно, выход NOx.
3. Уменьшение время пребывания продуктов сгорания в двигателе . Выброс NOx может быть снижен, если уменьшить время, в течение которого газ находится при высокой температуре.
4. Впрыск воды. Так как образование NOx сильно зависит от температуры, то разбавление топливовоздушной смеси инертным или негорючим веществом должно снижать выход оксидов азота.
5. Рециркуляция продуктов сгорания. Но для того чтобы эффективно снижать выход NOx, они должны возвращаться в первичную зону охлаждёнными.

Образование *сажи* в большей степени определяется физическими процессами распыливания топлива и смешения его с воздухом, чем кинетикой химических реакций. Устранение дымности отработавших газов на практике достигается путём предотвращения возникновения локальных областей в пламени, богатых топливом. Увеличение расхода воздуха в зоне горения способствует достижению этой цели.

## *Шум при работе газотурбинных двигателей и методы его снижения*

Уровень и спектральный состав шума является одним из важнейших параметров ГТД. Мощными источниками аэродинамических и газодинамических возмущений в ГТД являются воздухоприёмные и нагнетательные тракты компрессоров, камеры сгорания, проточные части турбин и газовыпускной тракт. Большое значение для шума ГТД имеет частота вращения турбомашин. Изменение мощности при  $n = \text{idem}$ , как правило не вызывает большого изменения уровня шума, так как установлено, что **наиболее сильным источником является компрессор**, шум которого мало зависит от мощности ГТД.

Появление шума **камеры сгорания** обусловлено колебаниями газа в ней. При определённых условиях она может служить мощным источником шума в связи с появлением, так называемого, вибрационного горения. При горении в трубе происходит самовозбуждение акустических колебаний самим горением (теплоподводом), колебания в свою очередь воздействуют определённым образом (обратная связь) на фронт пламени, вызывая усиление его вибрации. Основная частота шума при этом соответствует частоте продольных колебаний столба газа в камере, причем, чем короче длина пламенной трубы, тем выше возбуждаемая частота. Частотный состав шума камеры сгорания расширяется при наличии вихреобразования в потоке поступающего воздуха. Одновременно возрастает и уровень шума. Вихреобразование может быть вызвано различными неровностями внутренних поверхностей трубопровода, подводящего воздух в камеру сгорания, рёбрами тепловых компенсаторов и т.д. Возникновение вихрей в потоке и влияет на образование вибрационного горения в камере. Вибрационное горение имеет автоколебательный характер, когда акустические колебания возбуждаются самим горением, в свою очередь, воздействуя на фронт пламени и усиливая его вибрацию.

**Газовая турбина** не является основным источником шума в ГТД. Она имеет, как правило, хорошую звукоизоляцию корпуса и закрытые вход и выход газа, и хорошую звукоизоляцию. Поэтому её шум играет второстепенную роль.

Газодинамические возмущения в **выпускном тракте** тяжелых транспортных и стационарных ГТД практически полностью заглушаются при прохождении потока газов через регенератор. Поэтому шум в выпускном тракте определяется в основном вихреобразованием и турбулентностями, возникающими при прохождении потока по самому трубопроводу. При отсутствии в ГТД регенератора или утилизационного котла необходимо устанавливать глушители в выпускном патрубке.

## 4. ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Как отмечалось, нагрев рабочего тела в двигателях Стирлинга может осуществляться от любого источника энергии: сжигаемого в топочном устройстве (камере сгорания) топлива (жидкого, газообразного, твердого), расплавов солей, радиоизотопов, тепла недр Земли, а так же ядерной и солнечной энергии и т.п. В последних случаях говорить об экологической опасности с точки зрения расходования кислорода атмосферы и выброса вредных веществ из этих двигателей в неё не приходится вообще: они не потребляют кислород воздуха (в связи с чем являются единственными анаэробными двигателями среди всех типов тепловых двигателей) и не реализуют процесс сгорания. На сегодняшний день ДС – это, по существу, единственный тепловой двигатель, который может без вреда для здоровья людей использоваться в закрытых помещениях, складах, теплицах, туннелях и т.п.

В ДС можно использовать любое дешевое топливо: газ, уголь, дрова и даже торф. При этом, в отличие от ДВС, топливо сжигается непрерывно при низком давлении и оптимальном избытке воздуха в камере сгорания, расположенной вне рабочего объема. Горелка ДС обеспечивает практически полное сгорание топлива. Содержание вредных веществ в продуктах сгорания при таких условиях уменьшается до минимума. Характеристики ДС по токсичным компонентам в выхлопных газах весьма благоприятны в сравнении с соответствующими показателями других тепловых двигателей. В частности, при полной нагрузке при сжигании в ДС жидкого углеводородного топлива содержание СО оказывается в 14 и 9 раз меньше чем в отработавших газах одинаковых по мощности поршневых ДВС и ГТД соответственно, СН – в 200 и 8, NOx – в 13 и 120 раз.

Практическое отсутствие оксида углерода и различных несгоревших углеводородов в выхлопных газах ДС объясняется тем фактом, что процесс горения осуществляется в камере с высоконагретыми стенками непрерывно, а воздух может подводиться в любом избыточном количестве; это исключает возможность наличия части несгоревшего топлива в выхлопных газах.

Неясно, однако, почему, несмотря на относительно высокую температуру в камере сгорания снижается образование закиси ( $N_2O$ ) и оксида азота ( $NO$ ); но даже эти низкие значения окислов азота могут быть снижены не менее чем на 60 % путем относительно простой, но целесообразной рециркуляции выхлопных газов в зону горения.

В дополнение к этим уникальным достоинствам ДС в плане токсичности выбросов ДС практически бесшумен, так как он работает без периодических вспышек топлива, вызывающих резкое повышение давления в цилиндрах поршневых ДВС, и клапанного механизма газораспределения, при достаточно плавном протекании рабочего цикла, относительно равномерном крутящем моменте и не имеет резкого пульсирующего выхлопа. По этим причинам уровень шума от ДС ниже по сравнению с шумами, например, в дизелях той же мощности на 20–40 дБ.ДВС.

# 5. РЕАКТИВНЫЕ, РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Загрязнение воздушной среды транспортом с реактивными и ракетными двигательными установками происходит главным образом при их работе перед стартом, при взлете и посадке, при наземных испытаниях в процессе их производства и после ремонта, при хранении и транспортировке топлива, а так же при заправке топливом летательных аппаратов. Работа *жидкостного ракетного двигателя* сопровождается выбросом продуктов полного и неполного сгорания топлива, состоящих из  $O_2$ ,  $NO_x$ ,  $OH$  и др. При сгорании *твердого топлива* из камеры сгорания выбрасываются  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HC_1$  (соляная кислота – максимально концентрированный раствор хлороводорода),  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $C$ , а также твердые частицы  $Al_2O_3$  со средним размером 0,1 мкм (иногда до 10 мкм).

Продукт сгорания топлива по мере удаления корабля от Земли проникают в различные слои атмосферы, но большей частью в тропосферу.

*Выбросы продуктов сгорания топлива из ракетных двигателей по мере удаления корабля от Земли*

Атмосферный слой	Высота, км	Продукты сгорания, кг						
		$HC_1$	$C_1$	$NO$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$ (пар)	$Al_2O_3$
Приземный слой	0–0,5	24666	2741	1697	131	55075	46674	39284
Тропосфера	0,5–13	78517	9657	4618	839	172570	152677	26385
Стратосфера	13–50	59732	11727	239	2189	147684	146393	110304
Нижняя мезосфера	50–67	0	0	0	0	0	15542	0
Мезосфера - термосфера	67	0	0	0	0	0	119045	0

В условиях запуска у пусковой системы образуется облако продуктов сгорания, водяного пара от системы шумоглушения, песка и пыли. Объем продуктов сгорания можно определить по времени (обычно 20 с) работы установки на стартовой площадке и в приземном слое. После запуска высокотемпературное облако поднимается на высоту до 3 км и перемещается под действием ветра на расстояние 30–60 км. Оно может рассеяться, но может стать и причиной кислотных дождей. При старте и возвращении на Землю ракетные двигатели неблагоприятно воздействуют не только на приземный слой атмосферы, но и на космическое пространство, разрушая озоновый слой Земли. Масштабы разрушения озонового слоя определяются числом запусков ракетных систем и интенсивностью полетов сверхзвуковых самолетов. За 40 лет существования космонавтики в СССР и затем в России произведено свыше 1800 запусков ракет-носителей. По прогнозам фирмы Aerospace в XXI в. для транспортировки грузов на орбиту будет осуществляться до 10 запусков ракет в сутки, при этом выброс продуктов сгорания каждой ракеты будет превышать 1,5 т/с. В связи с развитием авиации и ракетной техники, а также интенсивным использованием авиационных и ракетных двигателей в других отраслях экономики существенно возрос их общий выброс вредных примесей в атмосферу. Однако на долю этих двигателей приходится пока не более 5% токсичных веществ, поступающих в атмосферу от транспортных средств всех типов.

### *Шум при работе реактивных, ракетных двигателей и методы его снижения*

Реактивный двигатель является сложным источником шума. Акустическое излучение генерируется во всех его элементах. В прямоточных и пульсирующих воздушно-реактивных двигателях это камера сгорания и реактивное сопло; в турбовентиляторных добавляется шум, создаваемый вентилятором.

Рассмотрим вопрос шумности и шумоглушения у авиационных турбореактивных двигателей, т.к. в них имеют место шумы, создаваемые и в камере сгорания, и реактивном сопле, и в турбине, и компрессоре. В ТРД есть два источника шума. *Первый* и наиболее мощный из них - *струя газа, вытекающая с большой скоростью из сопла* и смешивающаяся с окружающим воздухом. *Второй источник - турбина и компрессор*. Шум от второго источника значительно меньше, чем от первого, и он обычно проявляется на пониженных режимах работы двигателя, например, при заходе самолета на посадку, когда интенсивность шума от струи газа резко уменьшается. Поэтому наибольшее внимание обычно уделяют первому источнику шума. Уменьшение уровня этого шума можно достигнуть уменьшением скорости истечения газа из сопла или специальными шумоглушащими приставками, установленными на реактивное сопло. В некоторых случаях шумоглушением сочетают с реверсированием тяги.

Мероприятия, связанные с шумопоглощением ракетных двигателей, в настоящее время не проводятся .