



*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования*

**МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-
ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)**

С.В. Шелмаков

**Улучшение энерго-экологических
характеристик автомобилей**

Учебное пособие

Москва, 2018

УДК 504.61:621.43.068
ББК 20.18
Ш444

Рецензенты:

зав. кафедрой «Автомобили» МАДИ, д-р техн. наук, проф.
Иванов А.М.;

зав. отделом теории рабочих процессов и имитационного
моделирования энергетических установок
ФГУП «НАМИ», д-р техн. наук,
Козлов А.В.

Шелмаков, С.В.

Ш444 Улучшение энерго-экологических характеристик
автомобилей: учеб. пособие / С.В. Шелмаков – М.: МАДИ, 2018. –
282 с.

В учебном пособии представлена развёрнутая информация о механизмах формирования негативных воздействий автомобилей на окружающую среду и здоровье населения. Подробно рассмотрены такие методы улучшения энерго-экологических характеристик автомобилей, как совершенствование рабочего процесса двигателей, очистка отработавших газов, использование альтернативных видов топлива и схем приводов.

Учебное пособие предназначено для студентов автотранспортного и экологического направлений подготовки, для преподавателей и специалистов, занимающихся вопросами транспортной экологии.

УДК 504.61:621.43.068
ББК 20.18

© МАДИ, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Сокращения.....	7
Введение	9
Механизмы возникновения негативных воздействий автомобилей на окружающую среду	11
Формирование показателей энергоэффективности ДВС	11
Образование основных загрязняющих веществ в ДВС	15
Образование CO ₂ и его влияние на окружающую среду	15
Образование CO и его влияние на окружающую среду.....	17
Образование NO _x и их влияние на окружающую среду	20
Образование CH и их влияние на окружающую среду	26
Образование дисперсных частиц и их влияние на окружающую среду	40
Образование SO ₂ и его влияние на окружающую среду	54
<i>Контрольные вопросы по разделу</i>	56
Методы воздействия на рабочий процесс ДВС с целью уменьшения выбросов загрязняющих веществ	58
Методы совершенствования рабочего процесса двигателей с принудительным воспламенением рабочей смеси (ДВСПВ).....	58
Методы совершенствования рабочего процесса двигателей с воспламенением рабочей смеси от сжатия (ДВСВС)	60
Рециркуляция отработавших газов	62
Увеличение энергии искры	65
Управление углом опережения зажигания в ДВСПВ	72
Управление углом опережения впрыска топлива в ДВСВС	75
Управление изменением фаз газораспределения.....	78
Управление геометрией впускного тракта	81
Организация «послойного» смесеобразования.....	83
Управление степенью сжатия	85
Цикл Аткинсона (Миллера)	86
Управление наддувом.....	88
Совершенствование систем впрыска топлива	92
Совершенствование систем впрыска топлива ДВСПВ	93

Совершенствование систем впрыска топлива ДВСВС	96
Применение водных эмульсий дизельного топлива	99
Воспламенение гомогенного заряда от сжатия	100
<i>Контрольные вопросы к разделу</i>	101
Методы очистки отработавших газов ДВС	104
Методы жидкостной абсорбции	104
Методы нейтрализации.....	104
Термическая нейтрализация	104
Каталитическая нейтрализация	105
Решение проблемы холодного запуска ДВС	115
Очистка ОГ ДВСПВ при работе на бедной смеси.....	116
Очистка отработавших газов ДВСВС	118
Очистка ДВСВС от дисперсных частиц	119
Очистка ОГ ДВСВС от газообразных ЗВ	122
Снижение выбросов СН (ЛОС).....	125
<i>Контрольные вопросы по разделу</i>	126
Альтернативные автотранспортные топлива	128
Метан (природный газ) и биометан (биогаз).....	130
Получение	130
Свойства.....	131
Особенности использования в качестве автотранспортного топлива. 133	
Хранение на борту автомобиля	135
Пропан-бутан (сжиженный углеводородный газ, СУГ).....	145
Получение	145
Свойства.....	145
Особенности использования в качестве автотранспортного топлива. 147	
Оксигенаты и биооксигенаты.....	150
Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ).....	150
Этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ)	154
Трет-амил-метиловый эфир (ТАМЭ)	156
Диизопропиловый эфир (ДИПЭ)	158
Метанол.....	159
Этанол	164
Трет-бутиловый спирт (ТБС)	173
Растительные масла	175
Метилловые эфиры жирных кислот (МЭЖК)	177

Диметиловый эфир (ДМЭ)	179
Синтетические топлива и биотоплива	181
Водород и биоводород	184
Получение	184
Особенности использования в качестве автотранспортного топлива	191
Хранение водорода на борту автомобиля	193
Воздействие на состояние окружающей среды	197
<i>Контрольные вопросы по разделу</i>	199
Альтернативные схемы приводов автомобилей	201
Батарейные электромобили	202
Электромобили с топливными элементами	204
Солнцемобили	208
Гибридные автотранспортные средства	209
Гибридные электроавтомобили	214
Гибридные гидравлические автомобили	218
Гибридные пневматические автомобили	222
Гибридные маховичные автомобили	227
Моторы для электромобилей и электрогибридов	230
Коллекторные моторы	233
Бесколлекторные моторы	235
Накопители электроэнергии	242
Электрохимические аккумуляторы	242
Суперконденсаторы	254
Методы зарядки электромобилей и подключаемых электрогибридов	257
Кондуктивная (проводная) зарядка электромобилей	259
Беспроводная зарядка электромобилей	263
Электромобили как часть новой энергетической системы	265
<i>Контрольные вопросы по разделу</i>	267
Заключение	270
Список литературы	271
Приложение 1. Характеристики некоторых автотранспортных топлив	
Приложение 2. Характеристики автономных источников энергии	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью создания данного учебного пособия является систематизация, обобщение и доступное изложение обширной научно-технической информации о существующих и перспективных способах улучшения энерго-экологических характеристик автотранспортных средств.

Учебное пособие содержит подробную информацию как о механизмах формирования негативных экологических аспектов функционирования автомобильного транспорта, так и о способах их минимизации за счёт совершенствования конструкции автотранспортных средств.

Понимание механизмов формирования негативных экологических аспектов функционирования автомобильного транспорта является необходимым элементом для ориентирования в большом разнообразии мер совершенствования конструкции современных автомобилей, понимания целей и сути этих технологий.

Существующие и перспективные способы улучшения энерго-экологических характеристик автомобилей систематизированы и изложены в нескольких разделах. Основное внимание уделялось принципиальным особенностям тех или иных технологий и их влиянию на выходные энерго-экологические характеристики автомобилей.

При рассмотрении альтернативных автотранспортных топлив внимание уделялось как методам их производства, так и особенностям использования в автомобилях.

Учебное пособие предназначено для студентов автотранспортного и экологического направлений подготовки, имеющих базовые знания об устройстве ДВС, для преподавателей и специалистов, занимающихся вопросами транспортной экологии.

Изложение материала в данном учебном пособии предполагает наличие у читателей базовых знаний об устройстве автомобилей и двигателей внутреннего сгорания.

СОКРАЩЕНИЯ

- АТС – автотранспортные средства
ВМТ – верхняя мёртвая точка движения поршня
ДВС – двигатели внутреннего сгорания
ДВСПВ – ДВС с принудительным воспламенением рабочей смеси
ДВСВС – ДВС с самовоспламенением рабочей смеси при впрыске топлива в нагретый в результате сжатия воздух
ДЧ – дисперсные частицы
ДЭС – двойной электрический слой
ЕЭК ООН – Европейская экономическая комиссия Организации объединённых наций
ЗВ – загрязняющее (атмосферу) вещество
ИСГ – интегрированный стартер-генератор
ЛОС – летучие органические соединения
МТБЭ – Метил-трет-бутиловый эфир
НМТ – нижняя мёртвая точка движения поршня
ОГ – отработавшие газы
ОРВ – озоноразрушающие вещества
ОРС – озоноразрушающая способность
ОС – окружающая среда
ОУ – органический углерод
ОЧИ – исследовательское октановое число
ОЧМ – моторное октановое число
ПАУ – полициклические ароматические углеводороды
ПГП - потенциал глобального потепления
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДК_{МР} – максимально разовая предельно допустимая концентрация
ПДК_{СГ} – среднегодовая предельно допустимая концентрация
ПДК_{СС} – среднесуточная предельно допустимая концентрация
ПКВ – поворот коленчатого вала
ПОМ – протонообменная мембрана
ПХДД – полихлорированные дибензодиоксины
ПХДФ – полихлорированные дибензофураны
СОЗ – стойкие органические загрязнители

ТНВД – топливный насос высокого давления

ТЭ – топливный элемент

ТЭС – тетраэтилсвинец

ТЭМ-Г – тяговый электромотор-генератор

ЭУ – элементарный углерод

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологически устойчивого развития транспортной отрасли означает решение задачи по удовлетворению разумных потребностей в мобильности за счёт как можно более низких экологических, социальных и экономических издержек. Очевидно, что данная цель может быть достигнута исключительно на комплексной, межотраслевой основе. Формирование потребностей в мобильности должно также осуществляться исходя из принципов экологически устойчивого развития и с учётом возможностей и экологических ограничений транспортной системы.

Данное учебное пособие посвящено только вопросам технологической оптимизации конструкции автомобилей с целью улучшения их энерго-экологических характеристик. Это лишь небольшая часть мероприятий по реализации политики экологически устойчивого транспорта, не способная в одиночку обеспечить достижение целей этой политики. Об этом важно помнить во избежание иллюзорных надежд о возможности решения экологических проблем только за счёт развития технологий. Тем не менее, эта часть очень важная, т.к. позволяет не только снизить негативное воздействие автотранспорта на окружающую среду, но и обеспечить общий научно-технологический прогресс, стимулировать появление инновационных технологий не только в автомобилестроительной отрасли, но и во многих смежных отраслях экономики.

К направлениям технологической оптимизации, позволяющим более эффективно использовать транспортные средства и снизить удельные показатели негативного воздействия автомобилей на окружающую среду и здоровье населения, относятся:

1. Совершенствование рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания, работающих на традиционных видах топлива – бензине и дизельном топливе и оптимизация характеристик всех агрегатов трансмиссии.
2. Очистка отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.
3. Использование альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания – углеводородного и природного газов, водорода, метанола,

этанола, биодизельного топлива и т.п.

4. Применение альтернативных (электрических, пневматических, инерционных) и гибридных (сочетающих два или несколько источников энергии) схем приводов автомобилей.
5. Снижение сил сопротивления движению автомобиля за счёт уменьшения его собственной массы, коэффициентов аэродинамической обтекаемости кузова, сопротивления качению шин, повышения КПД агрегатов трансмиссии, шасси и кузова.
6. Повышение активной, пассивной и послеаварийной безопасности автомобилей.
7. Снижение внешнего шума автотранспортных средств.
8. Внедрение навигационных систем, систем бортовой самодиагностики и других информационных служб.
9. Повышение долговечности, надёжности и степени рециклируемости конструкции автомобиля, применение экологически безопасных конструкционных и эксплуатационных материалов.
10. Улучшение комфортабельности поездок (поддержание благоприятного микроклимата и состава воздуха внутри салона, снижение внутреннего шума и защита от электромагнитных полей, улучшение плавности хода и т.п.).

Рассмотрению большинства из этих направлений и посвящено данное учебное пособие. Некоторые аспекты, например, виброакустические, влияющие на безопасность, связанные с оценкой жизненного цикла, комфортностью и т.п., исключены из рассмотрения в силу их специфичности.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Формирование показателей энергоэффективности ДВС

В двигателях внутреннего сгорания (ДВС) происходит преобразование потенциальной энергии, заключённой в топливе, в кинетическую энергию вращения коленчатого вала двигателя. Высвобождение заключённой в топливе энергии происходит в результате организованного процесса его сгорания, т.е. окисления кислородом, содержащимся в воздухе.

Стехиометрическое (теоретически необходимое) количество сухого воздуха (кг), необходимое для *полного* сгорания (окисления) 1 кг топлива можно рассчитать по формуле¹:

$$l_0 = \frac{4,32 \cdot 16 \cdot \left[2 + 0,5 \frac{H}{C} - \frac{O}{C} + 2 \frac{S}{C} + 1 \frac{N}{C} \right]}{\left[12 + \frac{H}{C} + 16 \frac{O}{C} + 32 \frac{S}{C} + 14 \frac{N}{C} \right]}, \quad (1)$$

где H, C, O, S, N – элементарный состав топлива, т.е. содержание в нём соответственно водорода, углерода, кислорода, серы и азота, % массы.

Соотношение количеств воздуха и топлива в рабочей смеси обычно характеризуется **коэффициентом избытка воздуха** α :

$$\alpha = \frac{G_g}{G_m \cdot l_0}, \quad (2)$$

где G_g – масса сухого воздуха в рабочей смеси, кг;

G_m – масса топлива в рабочей смеси, кг;

l_0 – стехиометрический коэффициент, (кг воздуха/кг топлива) определяемый по формуле (1).

Когда действительное топливно-воздушное соотношение смеси, поступающей в ДВС, выше стехиометрического, то такая смесь обладает избытком воздуха и называется «бедной» ($\alpha > 1$). Наоборот, когда

¹ По SAE J1829 MAY 92.

действительное соотношение ниже стехиометрического, смесь «богатая» ($\alpha < 1$) и сгорание топлива неполное.

В ДВС с принудительным воспламенением рабочей смеси (ДВСПВ) регулирование мощности осуществляется за счёт изменения количества рабочей смеси примерно одинакового состава (т.н. **количественное регулирование мощности**), а в ДВС с воспламенением рабочей смеси от сжатия (ДВСВС) – за счёт изменения в широком диапазоне состава (или «качества») примерно одинакового количества рабочей смеси (т.н. **качественное регулирование мощности**).

Типичный диапазон изменения коэффициента избытка воздуха для ДВСПВ¹ – от 0,8 до 1,2. При этом внутри этого диапазона различают «мощностной» состав рабочей смеси ($\alpha \approx 0,92 \dots 0,97$) и «экономичный» состав рабочей смеси ($\alpha \approx 1,05 \dots 1,15$). Рабочая смесь мощностного состава имеет максимально возможную скорость сгорания (рис. 1).

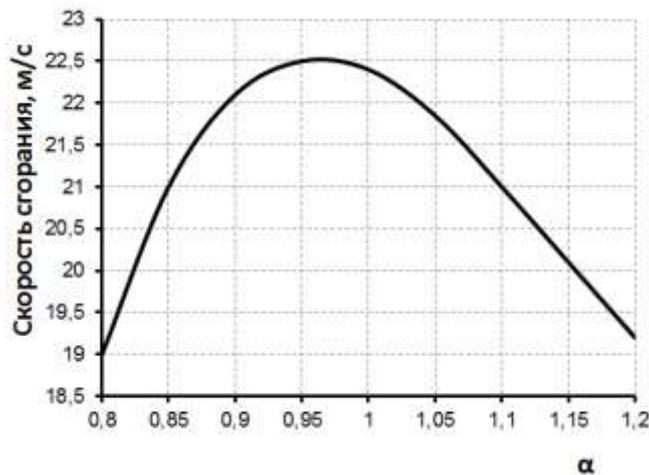


Рис. 1. Зависимость скорости сгорания от состава рабочей смеси

Для ДВСВС средний по камере сгорания коэффициент избытка воздуха всегда больше единицы $\alpha \geq 1,5$. Другими словами, ДВСВС работают исключительно на бедной смеси. Это, главным образом, и определяет их лучшую топливную экономичность. Однако, поскольку в момент впрыска порции топлива в камеру сгорания, наполненную воздухом, процессы смесеобразования, воспламенения и горения

¹ Исключая ДВСПВ, оснащённые системами очистки ОГ, а также ДВСПВ с непосредственным впрыском топлива. Эти технологии накладывают свои особые требования к составу рабочей смеси.

протекают одновременно, то локальный (т.е. в каждой конкретной точке камеры сгорания) коэффициент избытка воздуха может принимать значения от нуля (капли ещё не испарившегося топлива) до бесконечности (воздух на периферии камеры сгорания). Значение локального коэффициента избытка воздуха является одним из основных факторов, определяющих концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в отработавших газах ДВС.

Режимом работы ДВС называют сочетание текущих значений частоты вращения коленчатого вала и преодолеваемого крутящего момента. Различают установившиеся и неустойчивые режимы работы. **Установившимся режимом** называют такой режим, на котором ДВС работает относительно продолжительное время¹, за которое все исследуемые характеристики ДВС успевают стабилизироваться. Если переход от одного режима к другому происходит быстро², то говорят о **неустойчивых режимах**.

В координатах «частота вращения» – «крутящий момент» диапазон возможных режимов работы ДВС изображается фигурой, ограничиваемой кривой изменения крутящего момента по **внешней скоростной характеристике**, т.е. по характеристике, полученной при полной (максимально возможной) подаче топлива (рис. 2). В пределах этой фигуры изолиниями изображают изменение исследуемых характеристик ДВС (удельного расхода топлива, коэффициента избытка воздуха, концентраций ЗВ, различных температур и т.п.). Эти изображения называют **многопараметровыми характеристиками** ДВС.

Характер протекания рабочего процесса в камере сгорания ДВС на различных режимах работы может существенно различаться. Это, в свою очередь, приводит к существенному изменению показателей энергоэффективности и состава отработавших газов (ОГ). Например, на рис. 2 точками А и Б выделены два режима работы ДВС, лежащие на кривой постоянной мощности (т.е. мощность, вырабатываемая двигателем, на режиме А и на режиме Б одинаковая). Однако, как видно из многопараметровой характеристики удельного расхода топлива, показанного на рис. 2, эффективность двигателя на режиме «Б»

¹ Как правило, несколько минут.

² Как правило, за доли секунды.

ухудшается на 19% по сравнению с режимом «А» ($125/105 - 1 = 0,19$).

Автотранспортные ДВС работают практически во всём возможном диапазоне режимов работы – от режима холостого хода до режима максимальной мощности (номинального режима).

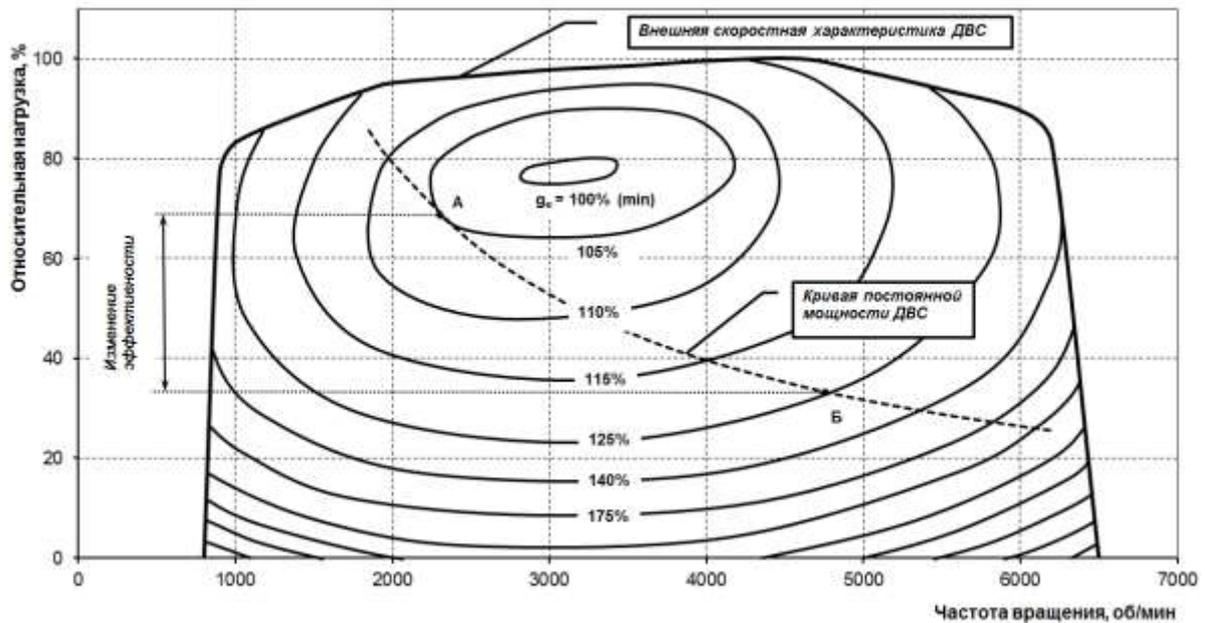


Рис. 2. Пример многопараметровой характеристики ДВСПВ по относительному изменению удельного расхода топлива

Характер изменения режимов работы ДВС определяется характером движения автомобиля, параметрами и настройками его трансмиссии, дорожными условиями и другими факторами. Характер движения автомобиля – продолжительность и интенсивность разгонов и замедлений, равномерных этапов движения с различными скоростями, стоянки с включённым двигателем – также определяется многими объективными и субъективными факторами. Поэтому показатели топливной экономичности одного и того же автомобиля могут изменяться в широких пределах¹. При сертификационных испытаниях вышеуказанные факторы фиксируются на стандартных (усреднённых, наиболее представительных) значениях, чтобы обеспечить сопоставимость получаемых результатов для разных автомобилей. В результате у многих создаётся ошибочное представление о том, что топливную экономичность автомобиля можно характеризовать одним-

¹ До нескольких десятков процентов.

двумя значениями, указываемыми в протоколе сертификации.

Показатели состава ОГ ДВС более «чувствительны» к изменению режимов работы ДВС, поэтому величина пробеговых выбросов одного и того же автомобиля может изменяться ещё в большем диапазоне¹.

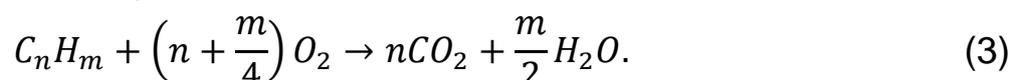
Образование основных загрязняющих веществ в ДВС

Преобразование энергии топлива в механическую работу, осуществляемое в ДВС, сопровождается образованием загрязняющих веществ. Всего в составе ОГ ДВС содержится более 400 соединений, которые по химическим свойствам, характеру воздействия на биосферу разделяются на нетоксичные (N_2 , O_2 , H_2O) и токсичные (CO_2 , CO , NO_x , C_xH_y , SO_2 , H_2S , сажа, соединения свинца и т.д.).

Образование CO_2 и его влияние на окружающую среду

Механизмы образования

Углерода диоксид (углекислый газ) CO_2 является продуктом полного сгорания углеводородных топлив. Химическая реакция полного сгорания углеводородов упрощённо может быть выражена стехиометрическим уравнением



Из данного уравнения следует, что при сжигании более тяжёлого топлива образуется большее число молекул CO_2 , чем при сжигании лёгких топлив. Однако в реальных конструкциях ДВС величина выбросов CO_2 зависит как от вида используемого топлива, так и от эффективности сгорания топлива. Автомобили, работающие на дизельном (более тяжёлом) топливе, благодаря своей экономичности, на единицу пробега выбрасывают примерно на 20% меньше CO_2 , чем автомобили, работающие на бензине (более лёгком топливе), и по этому показателю сравнимы с автомобилями, работающими на самом «простом» углеводородном топливе – природном газе (метане).

Таким образом, выбросы CO_2 определяются, в основном, двумя факторами: количеством израсходованного топлива и содержанием в

¹ До нескольких десятков и даже сотен раз.

топливе углерода. В отличие от других ЗВ CO_2 невозможно удалить из ОГ при помощи приемлемых для автотранспортного применения технологий очистки. Поэтому сокращение выбросов CO_2 на автомобильном транспорте представляет сложную задачу, приоритетность решения которой в последнее время постоянно увеличивается.

Количество выбросов CO_2 с ОГ можно оценить по формуле, выведенной на основе закона сохранения массы (или принципа «баланса углерода»): сколько углерода содержалось в топливе, столько его должно содержаться и в компонентах ОГ:

$$E_{\text{CO}_2} = \frac{c_q \cdot G_T \cdot \rho_T \cdot 10 - c_{\text{CO}} \cdot E_{\text{CO}} - c_{\text{CH}} \cdot E_{\text{CH}} - c_{\text{ДЧ}} \cdot E_{\text{ДЧ}}}{c_{\text{CO}_2}}, \quad (4)$$

где G_T – путь расход топлива, л/100 км;

$c_q, c_{\text{CO}_2}, c_{\text{CO}}, c_{\text{CH}}, c_{\text{ДЧ}}$ – содержание углерода в топливе, углекислом газе, угарном газе, углеводородах, дисперсных частицах (ДЧ) соответственно, %, см. табл. 1;

$E_{\text{CO}_2}, E_{\text{CO}}, E_{\text{CH}}, E_{\text{ДЧ}}$ – **пробеговые выбросы** углекислого газа, угарного газа, углеводородов, дисперсных частиц соответственно, г/км.

ρ_T – плотность топлива при 20°C , кг/л.

При отсутствии данных о реальных (фактических) пробеговых выбросах ЗВ с ОГ автомобиля можно использовать нормативные (предельно допустимые) значения, приводимые в соответствующих регламентах. Однако для автомобилей, полной массой более 3,5 тонн, нормативными значениями являются не пробеговые (г/км), а удельные (г/кВт·ч) выбросы, характеризующие ДВС как отдельный агрегат. В этом случае переход от удельных к пробеговым выбросам может быть упрощённо¹ осуществлён по формулам

$$\begin{aligned} E_{\text{CO}} &= N_{\text{CO}} \cdot E_T, \\ E_{\text{CH}} &= N_{\text{CH}} \cdot E_T, \\ E_{\text{ДЧ}} &= N_{\text{ДЧ}} \cdot E_T, \end{aligned} \quad (5)$$

где N_{CO} – нормативные удельные выбросы CO, г/кВт·ч;

N_{CH} – нормативные удельные выбросы CH, г/кВт·ч;

$N_{\text{ДЧ}}$ – нормативные удельные выбросы ДЧ, г/кВт·ч;

¹ Погрешность возникает из-за различия преобладающих режимов работы ДВС при сертификационных испытаниях и в реальной эксплуатации.

E_T – тяговая энергия, затрачиваемая двигателем на движение автомобиля, кВт·ч/км.

Содержание углерода в различных видах топлива и продуктах сгорания представлено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание углерода в различных веществах

Вещество	Относительная молекулярная масса	Содержание углерода, % по массе
С (углерод)	12,01	100
Дисперсные частицы	-	≈ 95,00
CO ₂ (углекислый газ)	44,008	27,29049
CO (угарный газ)	28,009	42,87907
C ₆ H ₁₄ (гексан)	86,172	83,62345
CH ₄ (метан)	16,042	74,86598
CH ₃ OH (метанол)	32,041	37,48322
C ₂ H ₅ OH (этанол)	46,067	52,14145
(CH ₃) ₃ COCH ₃ (МТБЭ)	88,145	68,12638
C ₃ H ₈ (пропан)	44,094	81,7118
C ₄ H ₁₀ (бутан)	58,12	82,65657
Бензин	≈ 105	≈ 86,5
Дизельное топливо	≈ 200	≈ 85,5

Влияние CO₂ на окружающую среду и здоровье человека

Углерода диоксид считается основным «парниковым» газом, оказывает влияние на процесс закисления (ацидофикации) мирового океана, в закрытых помещениях может формировать токсичные для человека концентрации.

Образование CO и его влияние на окружающую среду**Механизмы образования**

Углерода оксид (угарный газ, CO) является продуктом *неполного* сгорания углеводородного топлива.

Образование CO практически зависит от единственного фактора – коэффициента избытка воздуха α .

В ДВСПВ максимальные концентрации CO формируются при работе двигателя на «богатых» смесях ($\alpha < 1$), а по мере «обеднения» смеси ($\alpha > 1$) концентрации CO снижаются (рис. 3). Тем не менее,

незначительная концентрация CO в ОГ всё равно остаётся, поскольку процесс доокисления CO в CO₂ замедляется при снижении температуры в ходе расширения объёма камеры сгорания по мере движения поршня от верхней мёртвой точки к нижней мёртвой точке на рабочем такте¹.

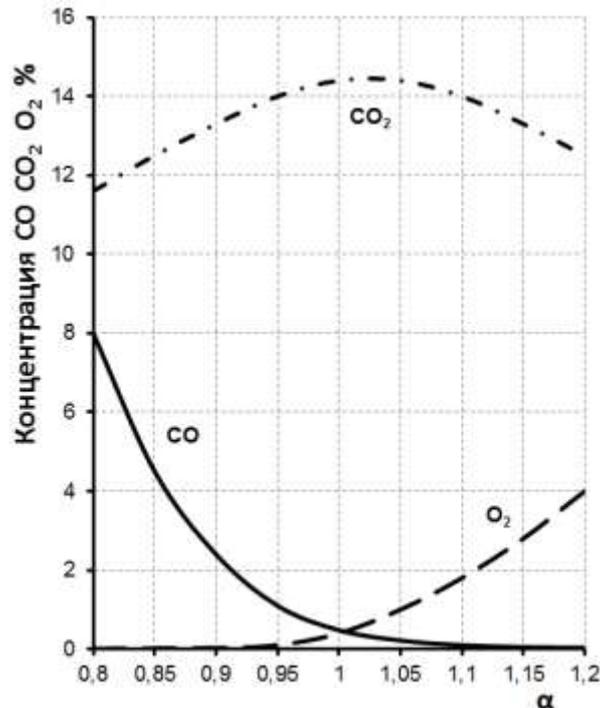


Рис. 3. Зависимость концентрации CO, CO₂ и O₂ в отработавших газах ДВСПВ на выходе из цилиндра в зависимости от состава рабочей смеси

Общий или местный недостаток кислорода в процессе сгорания топлива в ДВСПВ может быть обусловлен как регулировкой системы подачи топлива на обогащенную смесь, так и низким качеством смесеобразования (неоднородность рабочей смеси, наличие жидкой плёнки топлива во впускном трубопроводе, неоднородность распределения топлива по отдельным цилиндрам многоцилиндрового двигателя, цикловая неоднородность и т.п.).

В ДВСПВ² обогащение смеси применяют на режимах работы ДВС, близких к режиму холостого хода (т.н. режимы малых нагрузок) и на режимах, близких к режимам полной подачи топлива (т.н. режимы внешней скоростной характеристики). Необходимость в обогащении

¹ Этот эффект называется «закалкой» CO.

² Без систем очистки ОГ и без стратификации (расслоения) заряда.

рабочей смеси на режимах малых нагрузок обусловлена очень низким качеством смесеобразования и другими факторами, затрудняющими воспламенение смеси от искры зажигания. Другими словами, при подаче в цилиндры стехиометрической и тем более обеднённой смеси двигатель просто «глохнет». На режимах внешней скоростной характеристики необходимо подавать в цилиндры смесь «мощностного» состава ($\alpha \approx 0,95$), чтобы обеспечить максимально возможную энергоотдачу от ДВС. На всех остальных режимах работы ДВСПВ, называемых режимами частичных нагрузок, основным приоритетом считается обеспечение максимальной экономичности¹, поэтому в цилиндры подают смесь «экономичного» состава ($\alpha \approx 1,1 \dots 1,15$).

Состав подаваемой в цилиндры двигателя рабочей смеси определяет концентрацию СО в ОГ. Минимум СО образуется при работе ДВС на режимах частичных нагрузок, а на режимах малых и больших нагрузок концентрация СО в ОГ многократно увеличивается (рис.4).

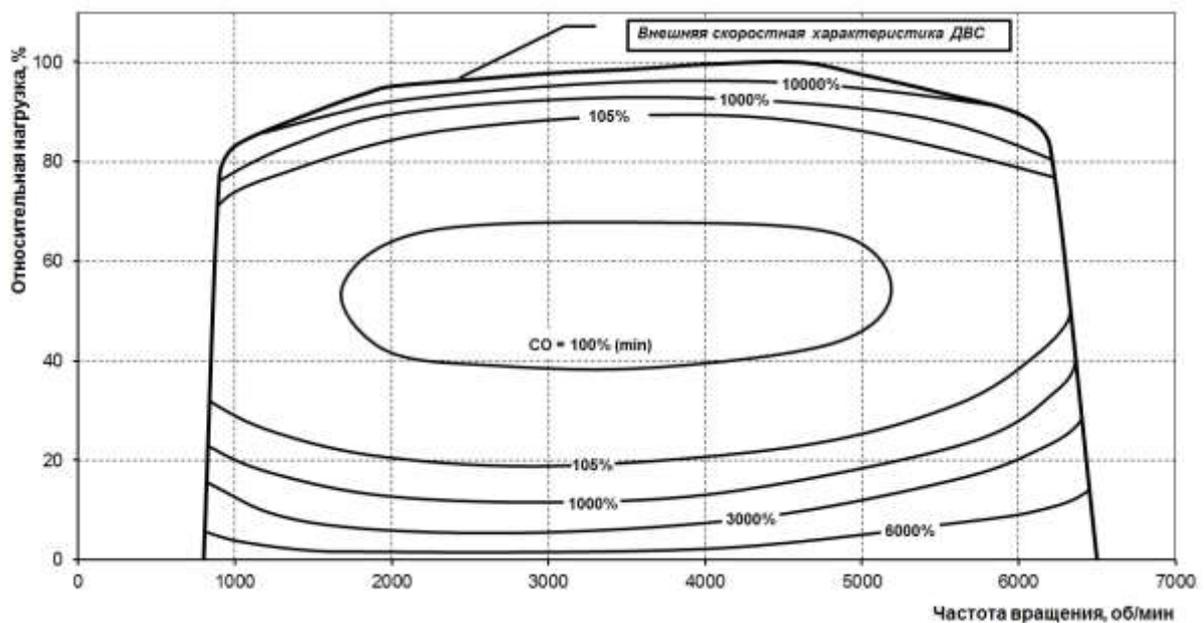


Рис. 4. Пример многопараметровой характеристики ДВСПВ по относительному изменению концентрации СО

¹ В ДВСПВ, оборудованных системой очистки ОГ с трёхкомпонентным нейтрализатором, состав рабочей смеси поддерживается стехиометрическим практически на всех режимах работы двигателя с тем, чтобы обеспечить эффективную нейтрализацию как СО и СН, так и NO_x.

Дизельные двигатели (или ДВСВС) всегда работают на бедных смесях, однако вследствие совмещения процессов смесеобразования и сгорания во время впрыска топлива в камеру сгорания, некоторое количество СО на начальном этапе сгорания всё равно образуется. Большая часть образовавшегося СО за время рабочего такта успевает доокислиться до CO_2 , поэтому концентрация СО в отработавших газах дизелей (на выходе из камеры сгорания) на порядок меньше, чем в ОГ ДВСПВ. Однако некоторое количество СО всё-таки остаётся, главным образом из-за эффекта «закалки» СО.

Влияние СО на окружающую среду и здоровье человека

Угарный газ реагирует с гемоглобином крови, препятствуя процессам переноса кислорода в организме человека. Наиболее чувствительным органом к «кислородному голоданию» является головной мозг, поэтому даже при относительно низких концентрациях СО в воздухе уже наступают неблагоприятные реакции: головокружение, потеря внимания, сонливость. Высокие концентрации могут привести к смерти. Поскольку угарный газ не имеет ни цвета, ни вкуса, ни запаха, обнаружить его при помощи органов чувств человек не может.

Угарный газ также участвует в процессах образования фотохимического смога и является «парниковым» газом.

Образование NO_x и их влияние на окружающую среду

В продуктах сгорания двигателей могут одновременно присутствовать шесть соединений азота с кислородом: N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5 . Наиболее значимыми из них являются NO и NO_2 , обозначаемые как NO_x .

При реализации в двигателях рабочего процесса с максимальными температурами цикла порядка $1500 \dots 2500^\circ\text{C}$ преобладающим в выбросах из оксидов азота становится **азота оксид** NO (99% в двигателях с искровым зажиганием и более 90% в дизелях) [1].

Считается, что в процессе горения NO может образовываться следующими путями:

- в результате низкотемпературного (порядка 800°C) окисления азотосодержащих соединений моторного топлива (**топливный NO**),

- при высокотемпературном (более 1300°С [2]) окислении азота воздуха (**термический NO**),
- вследствие столкновения углеводородных радикалов с молекулами азота в зоне реакций горения при наличии пульсаций температуры (**быстрый NO**) [3].

Топливный NO

В нефтепродуктах содержится до 5% азотистых соединений (0,3...0,6% по весу чистого азота). Основными азотосодержащими компонентами твёрдого и жидкого топлив являются пиридин и его производные [4]. Азот топлива легче вступает в реакцию окисления, чем атмосферный азот, поэтому для начала этой реакции достаточно умеренной температуры.

Фракции нефти с температурой перегонки до 350°С содержат не более 4% всего азота, содержащегося в ней. Поэтому для дизельных топлив, а тем более для бензинов, получаемых из нефти, «топливным NO» можно пренебречь. Однако для судовых топлив, у которых только 15% состава перегоняется до температуры 250°С, а также для мазутов нельзя пренебрегать содержанием топливного азота.

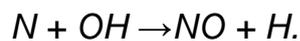
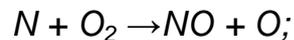
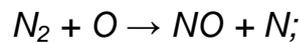
Термический NO

Фронт пламени, распространяющийся от искры, достигает температуры около 2800°С. Окисление азота воздуха происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания. При указанной температуре энергия столкновений молекул азота и кислорода становится достаточной для разрыва связи между атомами азота и образования NO. При этом концентрация NO может достигать 2%. При понижении температуры ОГ NO, будучи термодинамически неустойчивым, распадается на кислород и азот, но скорость этого процесса очень низка, т.к. температура в камере сгорания быстро снижается по мере увеличения объёма камеры сгорания при движении поршня из ВМТ в НМТ на такте рабочего хода¹. Таким образом, в условиях рабочего процесса ДВС NO оказывается достаточно стабильным и выделяется вместе с ОГ.

¹ Этот эффект называется «закалкой» NO_x.

Выделение оксидов азота определяется максимальной температурой горения, концентрацией азота и кислорода в зоне продуктов сгорания, продолжительностью процесса и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции.

Окисление азота воздуха в основном происходит по цепному механизму Зельдовича-Кека [5, 6]:



Выход оксида азота зависит также от скорости охлаждения продуктов сгорания. В бедных смесях (при относительно малой скорости реакции) выход NO определяется максимальной температурой рабочего цикла, т.е. кинетикой образования. В богатых смесях выход NO перестает зависеть от максимальной температуры рабочего цикла и определяется кинетикой разложения, т.е. «закалкой» образовавшегося оксида азота.

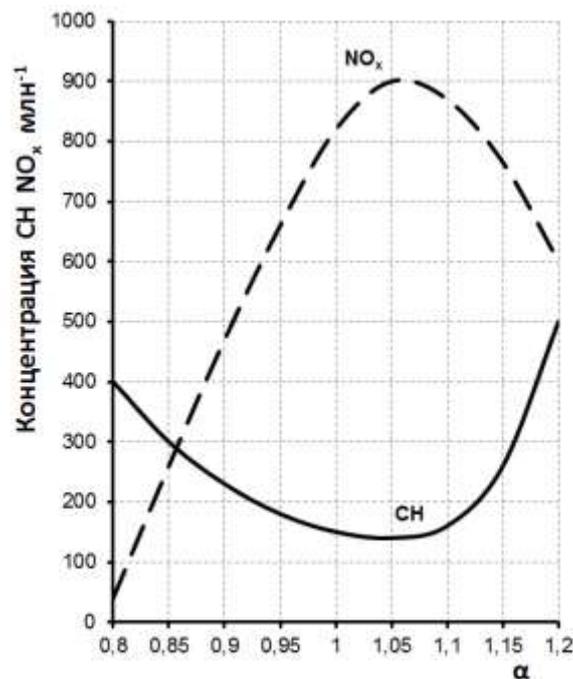


Рис. 5. Изменение концентраций CH и NO_x в ОГ ДВСПВ на выходе из цилиндра в зависимости от состава рабочей смеси

Максимальное содержание NO в ОГ ДВСПВ соответствует экономичным режимам работы, так как на этих режимах ($\alpha=1,05\dots 1,1$) при достаточно высоких температурах сгорания имеется большое количество свободного кислорода в зоне продуктов сгорания (рис. 5). При обеднении

рабочей смеси до $\alpha > 1,1$ снижается максимальная температура процесса сгорания, и концентрация NO в ОГ начинает уменьшаться.

В ДВСПВ максимальные концентрации термического NO образуются на режимах частичных нагрузок и высоких частот вращения (рис. 6). Именно в этой зоне сочетаются два фактора, определяющие образование NO, – высокая температура сгорания рабочей смеси и наличие «свободного»¹ кислорода в зоне продуктов сгорания. По мере уменьшения нагрузки и частоты вращения максимальная температура рабочего цикла начинает снижаться, т.к. уменьшается количество рабочей смеси, поступающей в камеру сгорания. В области малых нагрузок, кроме низкой температуры сгорания рабочей смеси, начинает оказывать влияние дефицит «свободного» кислорода, поэтому концентрации NO снижаются до минимальных значений. В области внешней скоростной характеристики ДВС максимальная температура рабочего цикла достаточно высокая, но дефицит «свободного» кислорода обуславливает некоторое снижение концентраций NO относительно максимума.

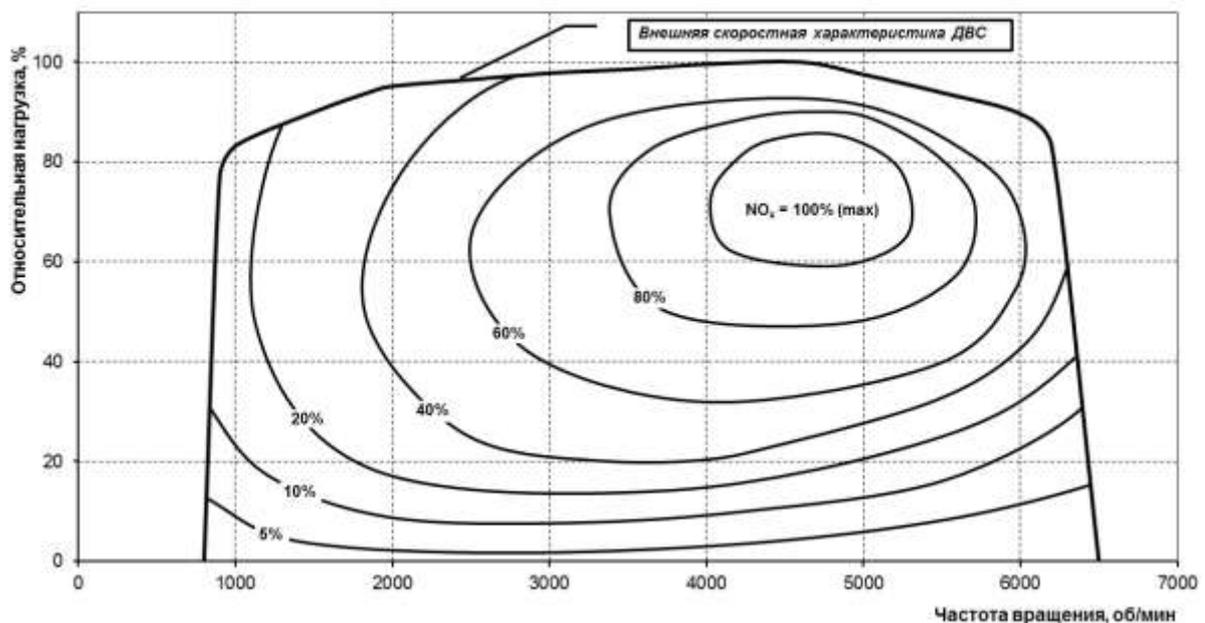


Рис. 6. Пример многопараметровой характеристики ДВСПВ по концентрации NO_x

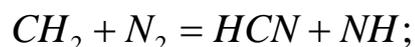
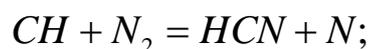
¹ Т.е. оставшегося после окисления топлива.

В ДВСВС коэффициент избытка воздуха изменяется в широких пределах, что связано с присущим этим двигателям принципом регулирования мощности за счёт изменения состава (или «качества») рабочей смеси. Однако средний состав рабочей смеси остаётся на всех режимах «бедным». В этих условиях образование термического NO зависит только от максимальной температуры рабочего цикла. Поэтому зона максимальных концентраций NO перемещается к внешней скоростной характеристике ДВС.

Образование NO в цилиндре ДВСВС зависит главным образом от локальных условий, т.е. от температуры и состава смеси в зоне сгорания основной массы топлива. При одном и том же среднем по камере сгорания α концентрация NO может существенно изменяться в зависимости от закона и качества смесеобразования и сгорания рабочей смеси.

«Быстрый» NO

«Быстрый» механизм образования NO характерен для границы распространения фронта пламени, где образуются «короткоживущие» активные углеводородные радикалы, расщепляющие молекулу азота и приводящие к формированию NO. Данный механизм описывается уравнениями:



Доля «быстрого» NO для случая ДВСПВ, работающего на стехиометрической смеси, оценивается в 5...10% [7].

Доля «быстрого» NO для случая дизельного двигателя уровня Евро-0 составляет около 13% от общего количества NO_x. Однако образование «быстрого» NO очень слабо зависит от режима работы ДВС и воздействий на рабочий процесс, поэтому для дизеля уровня Евро-4, а также для ДВСПВ с непосредственным впрыском доля «быстрого» NO может возрасти до 50% от его общего количества [3, 8, 9].

Трансформации NO_x в атмосфере

В выпускной системе двигателя (при наличии кислорода в продуктах сгорания), а также после выхода отработавших газов в

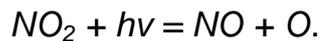
атмосферу происходит окисление NO до NO₂ по реакции:



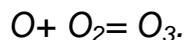
Степень трансформации NO в NO₂ зависит от времени года и принимается от 50% зимой до 80% – в летнее время.

Содержащийся в атмосферном воздухе NO₂ может вступать в реакции, приводящие к образованию **фотохимического смога**.

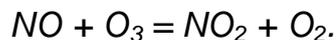
Для образования фотохимического смога необходимо, чтобы под влиянием кванта ультрафиолетового излучения ($h\nu$) NO₂ превратился в NO и при этом образовался атом кислорода:



Атомарный кислород (O), вступая в реакцию с молекулярным кислородом воздуха (O₂), образует т.н. «тропосферный» или «приземный» озон (O₃):

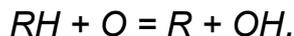


Часть образовавшегося озона расходуется на окисление NO:

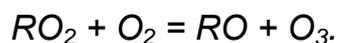
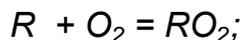


Регенерированный NO₂ вновь может разлагаться под влиянием ультрафиолетового излучения, продолжая цепь реакций.

Остальной озон и часть атомарного кислорода взаимодействуют с углеводородами и другими органическими соединениями:



Часть образовавшихся при этом свободных радикалов (R) реагирует последовательно с молекулярным O, вновь регенерируя озон:



Конечными продуктами этих реакций являются свободные радикалы (R) и другие органические соединения, обладающие высокой реакционной способностью и по этой причине получившие название **фотооксиданты**. При взаимодействии этих органических соединений с оксидами азота происходит образование других фотооксидантов – токсичных веществ, обладающих к тому же и раздражающим действием. В частности, речь идет об образовании пероксиацетилнитрата (ПАН) и пероксибензоилнитрата (ПБН):



Для острого воздействия ПАН и ПБН характерно раздражение слизистой оболочки органов зрения и обоняния, верхних дыхательных путей. Они конденсируют атмосферную влагу, в результате чего образуется туман. Пероксиды токсичны и для растений, произрастающих в городе.

Таким образом, при выбросе NO_x в атмосфере одновременно присутствуют и NO и NO_2 .

В работе [10] предложено использовать переменный коэффициент степени трансформации NO_x в NO и NO_2 , изменяющийся для NO_2 от 0,5 зимой до 0,8 летом и для NO от 0,326 зимой до 0,13 летом. Однако при официальных расчётах коэффициенты трансформации NO_x в эти два соединения следует принимать на уровне максимального значения трансформации (п. 1.5 ОНД-86 [11]), т.е. 0,8 для NO_2 и 0,13 – для NO .

Влияние NO_x на окружающую среду и здоровье человека

Азота оксид NO по своему токсическому воздействию аналогичен углерода оксиду CO .

Азота диоксид NO_2 легко растворяется в воде, образуя азотную и азотистую кислоты, которые раздражают слизистые оболочки глаз, гортани и лёгких. Кроме того, имеются сведения об образовании нитратов и нитрозаминов в желудочно-кишечном тракте, куда азотные кислоты попадают вместе со слюной.

По этой же причине NO_2 относится к соединениям, закисляющим окружающую среду. Кроме этого оксиды азота являются компонентами фотохимического и кислотного смога, «парниковыми» газами. Попадая в водоёмы, NO_2 способствует их эвтрофикации.

Образование СН и их влияние на окружающую среду

Углеводороды – наиболее многочисленная (до 400 различных соединений [12,13]) и разнообразная по свойствам группа ЗВ в ОГ ДВС.

По месту образования углеводороды можно разделить на две группы. 1) Углеводороды могут образовываться в камере сгорания ДВС в результате процессов сгорания топлива и попадать в атмосферу с отработавшими газами как из выпускной системы ДВС, так и из системы вентиляции картера. 2) Кроме того, углеводороды могут выбрасываться в

атмосферу в результате испарений топлива из системы питания автомобиля.

В составе ОГ автомобильных двигателей присутствуют углеводороды, образующиеся тремя путями:

- в результате неполного сгорания топлива;
- в результате реакций цепочно-теплого взрыва (пиролиза, синтеза), когда образуются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ¹), альдегиды, кетоны, фенолы и т.п.;
- в результате взаимодействия углеводородов с хлорсодержащими (или бромсодержащими²) веществами, содержащимися в топливе, когда образуются диоксины и фураны (ПХДД/ПХДФ), также полихлорированные бифенилы (ПХБ).

Выбросы СН в виде испарений топлива из системы питания

Выбросы СН в виде испарений представляют собой пары топлива, выделяемые системой питания ДВС. Они подразделяются на:

- выбросы СН, образующиеся в результате «суточного дыхания» топливного бака, картеров двигателя и агрегатов трансмиссии в процессе их нагревания и охлаждения в течение суточного колебания температуры окружающего воздуха;
- выбросы СН в результате т.н. «горячего насыщения», образующиеся в результате испарения топлива из впускного трубопровода двигателя после его выключения;
- нерабочие потери СН, например, из некоторых пластических материалов, из которых изготовлена топливная система и которые, как предполагается, допускают потери в результате проницаемости, т.е. в результате медленной диффузии топлива через материал.

На уровень испарений топлива, прежде всего, оказывают влияние температура испарения топлива и температура окружающей среды.

¹ ПАУ – полициклические ароматические углеводороды. Для целей кадастров выбросов используются следующие четыре индикаторные соединения: бензо(α)пирен, бензо(β)флуорантен, бензо(к)флуорантен и индено(1,2,3-сd)пирен.

² Соединения брома могут приводить к образованию бромированных диоксинов или фуранов.

Образование СН в результате неполного сгорания топлива

Топливо, состоящее из различных углеводородов, сгорает в ДВС не полностью даже при наиболее оптимальных условиях. Несгоревшие углеводороды остаются в зазорах, которые малы для распространения пламени (рис. 7), а также в зонах гашения пламени у стенок камеры сгорания, переобеднённых и переобогащенных зонах пространства камеры сгорания.

В «зоне гашения» пламени, расположенной возле стенок камеры сгорания, в процессе сгорания формируется пониженная температура рабочей смеси, что приводит к затуханию реакций горения топлива. Объём рабочей смеси в зоне гашения зависит от размеров цилиндра, степени сжатия, отношения хода поршня к диаметру цилиндра (S/D), формы камеры сгорания, наличия вытеснителей. Кроме того, в отдельных элементах объёма камеры сгорания вследствие неоднородности состава топливовоздушная смесь может оказаться вне пределов воспламеняемости. Это также приводит к появлению зон с высоким содержанием несгоревших углеводородов.

Рост количества несгоревших углеводородов наблюдается и при работе двигателя на переобеднённых смесях из-за гашения пламени или пропуска зажигания.

Наконец, небольшая часть несгоревших углеводородов может «выдавливаться» в выпускной коллектор ДВС через микроскопический зазор между поверхностью номинально закрытого выпускного клапана и его седлом.

Минимальное содержание СН в отработавших газах ДВСПВ соответствует регулировке двигателя на экономичный состав смеси $\alpha=1,05...1,1$. Дальнейшее обеднение смеси приводит к повышению концентрации СН (рис. 5). Это можно объяснить уменьшением скорости сгорания бедных топливовоздушных смесей (рис. 1), увеличением степени цикловой неравномерности, а также возможностью выключения отдельных цилиндров многоцилиндрового двигателя из работы, обусловленной неравномерностью распределения топливовоздушной смеси по цилиндрам.

Причинами пропуска зажигания рабочей смеси в отдельных циклах могут быть отклонение от оптимального состава смеси и степени

турбулентности в зоне свечи зажигания, различия в общем составе смеси в отдельных циклах. Степень цикловой неравномерности зависит также от способа зажигания топливоздушная смеси в цилиндре, от энергии искры и т.д. Пропуски зажигания могут иметь место, когда топливоздушная смесь сильно разбавлена остаточными газами, например на режимах холостого хода.

Наибольшее количество несгоревших СН образуется в первую минуту после запуска холодного двигателя. Причиной этого является временное обогащение рабочей смеси в первые секунды запуска двигателя, необходимое для того, чтобы испаряющиеся в этот момент легкокипящие фракции топлива, сформировали рабочую смесь, которую можно было бы надёжно воспламенить искрой. Труднокипящие фракции топлива ещё несколько циклов остаются в жидком виде на поверхности впускного клапана и в цилиндре, не участвуя в горении, но внося свой вклад в выброс несгоревших СН.

Перечисленные выше механизмы могут приводить к довольно высокому содержанию СН в ОГ. Однако существуют и процессы, способствующие снижению выброса СН с ОГ.

Некоторое количество углеводородов из состава топлива абсорбируется масляной плёнкой на стенках цилиндра (или адсорбируется слоем нагара, образующимся на днище поршня и поверхности камеры сгорания) в конце рабочего такта, когда температура в камере сгорания снижается. Эти углеводороды удерживаются в абсорбенте (масле) или адсорбенте (нагаре) в ходе последующих тактов выпуска и впуска, а затем десорбируются в ходе начала рабочего такта и могут догорать (доокисляться).

Кроме этого часть углеводородов¹, выходящих из цилиндра двигателя, доокисляется непосредственно в выпускном коллекторе, поскольку температура в нём ещё достаточно высока.

В ДВСВС несгоревшие углеводороды образуются в локальных переобеднённых или переобогащённых зонах камеры сгорания, а также в результате «проникновения» капелек неиспарившегося топлива на стенки камеры сгорания в **период задержки воспламенения**. Периодом

¹ Примерно одна треть.

задержки воспламенения называется промежуток времени от момента начала впрыска топлива до момента формирования видимого фронта пламени. Этот период зависит от многих факторов, в том числе от цетанового числа дизельного топлива, которое характеризует его самовоспламеняемость.

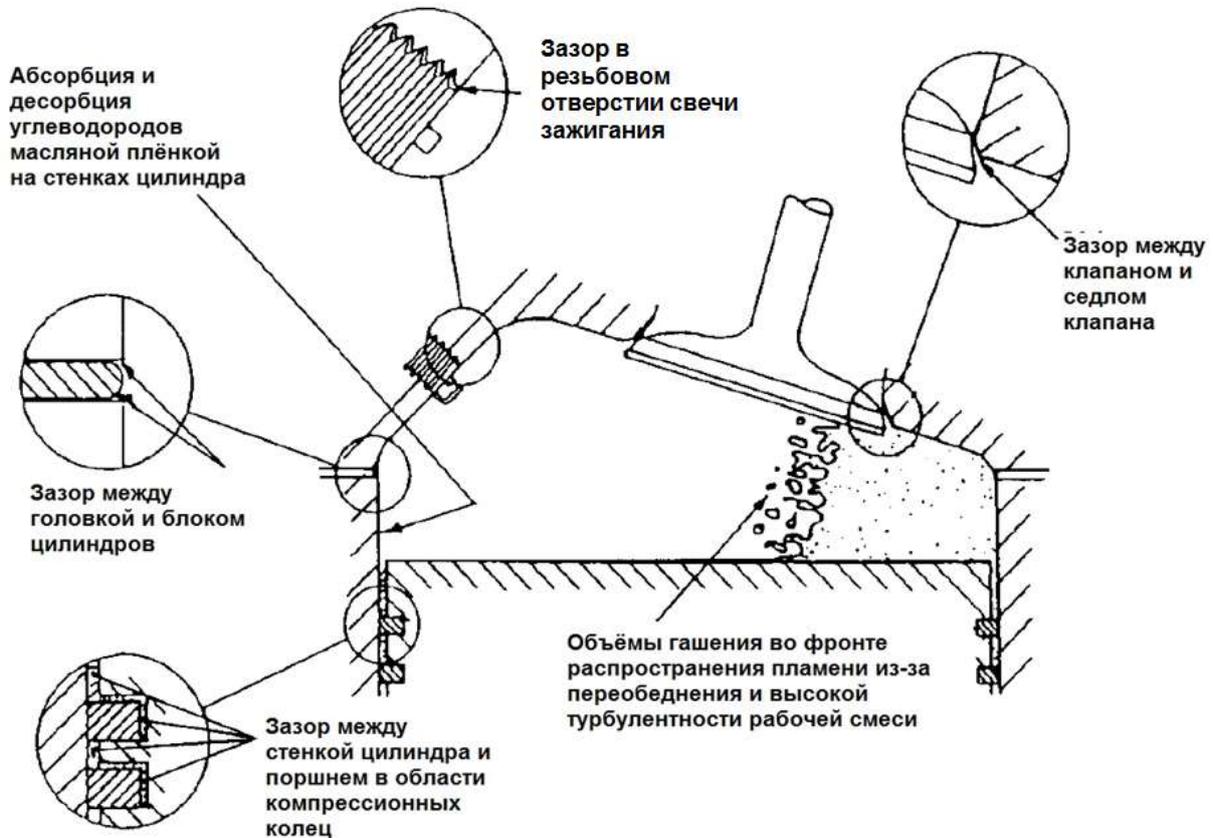


Рис. 7. Области образования неполного сгорания топлива в камере сгорания ДВСПВ. Источник: [13]

Локальное переобеднение смеси играет преобладающую роль на образование СН на режимах холостого хода и малых нагрузок. На режимах внешней скоростной характеристики преобладающим фактором образования СН становится локальное переобогащение смеси.

Фактор «проникновения» капелек неиспарившегося топлива на стенки камеры сгорания особенно значим для двигателей с небольшим диаметром цилиндра, т.к. в этом случае расстояние от форсунки до стенок цилиндра мало.

Кроме того, некоторое количество СН является следствием утечек топлива из сопел форсунки, происходящих после окончания основного

процесса впрыска топлива. Это топливо уже не участвует в процессе горения, а лишь испаряется, переходя в разряд углеводородов.

Образование СН в результате химических превращений при горении топлива

В процессе сгорания рабочей смеси в камере сгорания ДВС углеводороды не только реагируют с кислородом, образуя углекислый газ и воду, но и друг с другом, а также с другими веществами, попадающими в камеру сгорания в виде примесей из топлива, моторного масла и воздуха. В результате этих реакций могут образовываться углеводороды довольно сложного состава. Количество этих углеводородов мало, однако среди них присутствуют соединения, обладающие очень высокой токсичностью, поэтому механизму их образования следует уделять должное внимание.

Как в ДВСПВ, так и в ДВСВС могут образовываться **альдегиды**, если часть процесса сгорания протекает при низких температурах, что наблюдается при охлаждении смеси холодными поверхностями камеры сгорания или при сгорании очень обедненной смеси в конце процесса сгорания в двигателях с послойным смесеобразованием. В дизелях альдегиды образуются в период **предпламенных реакций** (их называют также «холодным пламенем»). Альдегиды и пероксиды (перекиси) являются типичными продуктами этих реакций [14].

Состав топлива является первостепенным фактором, влияющим на данный механизм образования СН. В топливе могут присутствовать ациклические (алифатические) и циклические углеводороды. Как правило, линейная структура молекул (например, гептан, октан, гексан) дает очень хорошую воспламеняемость, но низкую детонационную стойкость, характеризуемую т.н. **октановым числом**. Октановое число равно содержанию (в % по объёму) изооктана (2,2,4-триметилпентана) в его смеси с n-гептаном, при котором эта смесь эквивалентна по детонационной стойкости исследуемому топливу в стандартных условиях испытаний. В зависимости от метода определения различают исследовательское октановое число (ОЧИ) и моторное октановое число (ОЧМ).

Структура углеводородов с дополнительными боковыми цепями (изооктан), а также кольцеобразная структура молекул (циклогексан,

бензол, толуол, ксилол) обеспечивают более высокую детонационную стойкость (табл. 2). Однако именно циклические углеводороды могут образовывать ещё более сложные **полициклические ароматические углеводороды** (ПАУ), обладающие крайне высокой токсичностью.

Таблица 2

Октановые числа некоторых углеводородов [15, 16]

Название углеводорода	Октановое число по моторному методу	Октановое число по исследовательскому методу
Метан C_4H_4	110...122	107,5...135
Этан C_2H_6	104...108	107,1...116
Пропан C_3H_8	97...105	105,7...112
Бутан C_4H_{10}	90,1...94	91...95
Изобутан $(\text{CH}_3)_3\text{CH}$	97,6...99	100,4...102
Пентан C_5H_{12}	61,7...70	61,7...62
Гексан C_6H_{14}	26	24,8
Гептан C_7H_{16}	0*	0*
Октан C_8H_{18}	-20...-17	-15...-19
2,2,4-Триметилпентан (изооктан) C_8H_{18}	100*	100*
Циклогексан C_6H_{12}	77,2	83
Бензол C_6H_6	108...111,6	113
Толуол C_7H_8	102,5	115,7
Ксилол $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$	100,6	116,4

Примечание: * – значения по определению.

Наибольшим уровнем токсичности, сравнимым с токсичностью всех остальных ПАУ, отличается бенз(α)пирен, адсорбируемый в виде твердых иглообразных образований на поверхности сажи. Этот продукт образуется при 800...900°C. На нестационарных режимах – при разгонах и замедлениях – а также при запуске холодного двигателя количество

выбрасываемого бенз(α)пирена повышается примерно в 10 раз. Установлено, что основной причиной образования бенз(α)пирена является наличие в топливе бензола и других ароматических соединений. Поэтому в настоящее время содержание ароматических компонентов в топливах нормируется (см. табл. 3 и 4) [17].

Таблица 3

Требования к содержанию бензола и ароматических углеводородов в бензине

Характеристики автомобильного бензина	Единица измерения	Нормы в отношении экологического класса			
		К2	К3	К4	К5
Объемная доля бензола, не более	%	5	1	1	1
Объемная доля ароматических углеводородов, не более	%	Не определяется	42	35	35

Таблица 4

Требования к содержанию полициклических ароматических углеводородов в дизельном топливе

Характеристики дизельного топлива	Единица измерения	Нормы в отношении экологического класса			
		К2	К3	К4	К5
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, не более	%	Не определяется	11	11	8

Доля ароматических углеводородов в топливе для реактивных двигателей летательных аппаратов с дозвуковой скоростью полета не должна превышать: 25% (по объёму) – для топлива «Джет-А1» и 22% (по массе) – для топлива «ТС-1». Доля ароматических углеводородов в топливе для реактивных двигателей летательных аппаратов со сверхзвуковой скоростью полёта не должна превышать 0,1% (по массе).

Образование галогенсодержащих СН

К **галогенам** относятся фтор F, хлор Cl, бром Br, йод I, астат At, а также (формально) искусственный элемент Теннесин Ts. Все галогены — энергичные окислители, поэтому встречаются в природе только в виде

соединений. Реагируя при определённых условиях с углеводородами, они могут образовывать **стойкие органические загрязнители** (СОЗ), в частности, **диоксины** и **фураны**. Кроме того, галогены используются при производстве хладагентов, обладающих озоноразрушающими свойствами.

Стойкие органические загрязнители

Смазочные масла и топливо могут содержать галогенизированные соединения в виде присадок или примесей. При сжигании топлива эти соединения могут превращаться в ПХДД/ПХДФ и затем выбрасываться в атмосферу вместе с отработавшими газами [18].

В некоторых странах 1,2-дибромэтан в сочетании с 1,2-дихлорметаном или 1,2-дихлорэтаном использовался в качестве «вещества-выносителя¹» в этилированном бензине. Применение трехкомпонентного каталитического нейтрализатора отработавших газов, эффективность и долговечность работы которого в существенной степени зависят от примесей свинца, серы, железа, марганца, а также высокая токсичность тетраэтилсвинца (ТЭС), привело к отказу от использования этилированного бензина. В США с 1976 года началось постепенное вытеснение ТЭС-содержащего топлива, которое было завершено к 1986 году. В Евросоюзе этилированный бензин был запрещён с 1 января 2000 года, хотя большинство стран-членов ввело подобный запрет значительно раньше. Китай отказался от использования ТЭС в 2000 году, но некоторое количество бензина производится на экспорт. В России этилированный бензин был запрещён с 1 июля 2003 года [19].

В качестве хлорсодержащих присадок к моторным маслам применяют хлорированные насыщенные алифатические и ароматические углеводороды, гексахлорэтан, гексахлорциклопентадиен и др. За

¹ В прямогонный бензин, обладающий неприемлемо низкой детонационной стойкостью (низким октановым числом), в качестве присадки, улучшающей эту характеристику, добавляли «этиловую жидкость», содержащую 54% тетраэтилсвинца $Pb(C_2H_5)_4$ (ТЭС). Однако при этом в камере сгорания двигателя наблюдалось интенсивное нагарообразование. «Вещества-выносители» (40% бромистого этила C_2H_5Br и 6% хлористого нафталина) добавлялись в этиловую жидкость для уменьшения нагарообразования.

рубежом хлорированные парафины выпускаются с содержанием хлора от 33 до 50 %. Отечественная промышленность в качестве хлорсодержащей присадки производит хлорированный парафин, содержащий 40...43 % хлора [20]. Хлорсодержащие присадки к моторным маслам образуют на трущихся металлических поверхностях плёнки хлоридов железа, что снижает вероятность задира.

В настоящее время различают три основных механизма образования ПХДД/ПХДФ при сгорании органических соединений [18]:

- «прохождение» ПХДД/ПХДФ, содержащихся в исходном топливе, «через» процесс горения в неизменном виде;
- образование ПХДД/ПХДФ из галогенсодержащих ароматических углеводородов – «прекурсоров», которые образуются в ходе неполного сгорания топлива;
- синтез ПХДД/ПХДФ в цепи гетерогенных реакций, протекающих на поверхности сажи, с участием углерода, водорода, кислорода и хлора в присутствии наночастиц переходных металлов¹.

Второй и третий механизмы являются взаимосвязанными.

Хотя хлор и является необходимым для образования ПХДД/ПХДФ элементом, практические исследования показывают, что его присутствие в топливе не является определяющим фактором, влияющим на концентрацию ПХДД/ПХДФ в отработавших газах. Кроме факторов, влияющих на условия реализации вышеперечисленных механизмов образования ПХДД/ПХДФ, первоочередное значение имеет температура горения. Максимум образования ПХДД/ПХДФ приходится на температурный диапазон от 200°С до 450°С.

Озоноразрушающие углеводороды

Озоноразрушающие вещества (ОРВ) используются в качестве хладагента в кондиционерах и рефрижераторах. Кроме того, ОРВ используются при производстве вспененных пластиков и электронных устройств, входящих в конструкцию транспортных средств и объектов транспортной инфраструктуры, а также в качестве аэрозольных пропеллентов, растворителей, огнегасителей, стерилантов в смежных

¹ К переходным металлам относится медь, серебро, металлы платиновой группы и т.п.

отраслях промышленности¹.

К ОРВ относятся органические химические соединения, содержащие хлор или бром. Изначально синтезированные в качестве хладагентов, они получили широкое применение и в других сферах человеческой деятельности благодаря своей химической инертности. Однако именно эта инертность и обеспечивает очень большое время существования этих соединений в атмосфере, обуславливая их глобальное распространение и высокий потенциал озоноразрушающей и «парниковой» способности.

Для обозначения хладагентов в международной практике используют «промышленный код», состоящий из общего префикса R (англ. refrigerant – хладагент), или префикса, обозначающего состав элементов, содержащихся в соединении, и числового кода, идентифицирующего состав молекулы [21].

В префиксе первым из элементов по порядку пишут H для водорода при его наличии, а последним – C для углерода. Промежуточные буквы обозначают галогены, перечисленные в следующем порядке:

I – для йода,

B – для брома,

C – для хлора,

F – для фтора.

Для циклических соединений перед числовым кодом хладагента используют букву C.

Хладагенты на основе эфиров обозначают при помощи префикса E, предшествующего числовому коду (англ. ethers – эфиры).

При наличии в молекуле хладагента атомов брома (йода) после числового кода ставится буква B (I) и цифра, указывающая число его атомов.

Таким образом, обозначение может принимать вид:

¹ Хладагент (англ. refrigerant) – текучая среда, используемая для переноса теплоты в компрессионных машинных холодильных установках, которая поглощает теплоту при низкой температуре и низком давлении и, как правило, при изменении фазового состояния отдает её при более высокой температуре и более высоком давлении.

- (R-)CFC-wxyz – хлорфторуглероды (ХФУ или CFC);
- (R-)BFC-wxyz – бромфторуглероды (БФУ или BFC);
- (R-)HCFC-wxyz – гидрохлорфторуглероды (ГХФУ или HCFC);
- (R-)HBFC-wxyz – гидробромфторуглероды (ГБФУ или HBFC);
- (R-)HFC-wxyz – гидрофторуглероды (ГФУ или HFC);
- (R-)FC-wxyz – фторуглероды (ФУ или FC¹) и т.п.,

где w – количество двойных связей углерод-углерод в соединении (если w=0, тогда w исключается из кода);

x – количество атомов углерода в соединении минус 1 (если x=0, тогда x исключается из кода);

y – количество атомов водорода в соединении плюс 1;

z – количество атомов фтора в соединении.

Если после цифрового кода ставится маленькая буква a, b, c и т.д., то это значит, что обозначение относится к несимметричному изомеру² данного соединения.

Смеси обозначают номерами хладагентов серии 400 или 500. Другие органические соединения обозначают идентифицирующим номером из серии 600. Неорганические соединения обозначают идентифицирующим номером из серии 700 и 7000.

Влияние СН на окружающую среду и здоровье человека

Углеводороды весьма различны по своим химическим, физическим и токсикологическим свойствам. Соответственно, разнообразны и негативные процессы в окружающей среде и организме человека, протекающие с их участием.

Определённые группы углеводородов играют существенную роль в процессе образования фотохимического смога, являются парниковыми газами, озоноразрушающими веществами.

Способность ОРВ разрушать озоновый слой характеризует величина, называемая «озоноразрушающая способность» (ОРС). За

¹ Когда хладагент полностью фторирован, используют запись PFC – перфторуглерод.

² Изомеры – два или более соединений, имеющих одинаковый химический состав при различной молекулярной конфигурации. Изомеры имеют разные физические свойства.

единицу ОРС была принята озоноразрушающая способность хладагента CFC-11 («фреон-11¹»). Чем опаснее вещество для озонового слоя, тем выше его ОРС.

По степени ОРС галоидопроизводные углеводороды разделены на три группы:

- соединения с высокой озоноразрушающей активностью ($ОРС > 0,1$) – это хлорфторуглероды (ХФУ) R11, R12, R13 (или по международному обозначению CFC11, CFC12, CFC13 и т.д.) и др.;
- соединения с низкой озоноразрушающей активностью ($ОРС < 0,1$) – это гидрохлорфторуглероды (ГХФУ) R21, R22, R141b (или по международному обозначению HCFC21, HCFC22, HCFC141b и т.д.) и др., в молекулах которых содержится водород. Для этих веществ характерно меньшее время существования в атмосфере по сравнению с ХФУ, и, как следствие, они оказывают меньшее влияние на разрушение озонового слоя.
- соединения, не содержащие атомов хлора, – фторуглероды ФУ (FC), гидрофторуглероды ГФУ (HFC), а также природные хладагенты (аммиак, диоксид углерода, вода, углеводороды), считаются полностью озонобезопасными ($ОРС=0$). Таковыми являются хладагенты R134, R134a, R152a, R143a, R125, R32, R23, R218, R116, R290, R600 (бутан), R600a (изобутан), R717 (аммиак) и др.

Основные экологические характеристики некоторых галогенсодержащих углеводородов, в том числе использующихся в сфере транспорта, представлены в табл. 5. Наиболее опасные из этих веществ в настоящее время не используются, т.к. их производство было запрещено международными договорами². Однако вещества с менее опасными, но, тем не менее, оказывающими негативное воздействие на

¹ Название «фреон» является торговой маркой некоторых ХФУ, выпускавшихся американской фирмой Du Pont с середины 1930-х годов. В России для обозначения многих хладагентов использовалось название «хладон», а для соединений, использующихся в пожаротушении, общеупотребительным является название «галон» или «халон».

² Международными документами по охране озонового слоя явились Венская конвенция 1885 года и, затем, Монреальский протокол 1987 года по веществам, разрушающим озоновый слой.

озоновый слой гидрохлорфторуглеродами, применяются во всё возрастающем темпе [21], [22], [23], [24].

Таблица 5

Основные экологические характеристики некоторых хладагентов

Номер хладагента	Префикс, обозначающий состав	Химическое наименование (торговая марка)	Время «жизни» в атмосфере, лет	ОРС	ПГП ₁₀₀
R-11	CFC	Трихлорфторметан	45	1	4660
R-12	CFC	Дихлордифторметан	100	1	10200
R-13B1	BFC (галон)	Трифторбромметан	65	10	6290
R-114B2	BFC (галон)	1,1,2,2-тетрафтордибромэтан	20	6	1470
R-22	HCFC	Хлордифторметан	11,9	0,05	1760
R-32	HFC	Дифторметан (метиленфторид)	5,2	0	677
R-125	HFC	Пентафторэтан	28,2	0	3170
R-134a	HFC	1,1,1,2-Тetraфторэтан	13,4	0	1300
R-141b	HCFC	1,1,1-фтордихлорэтан	9,2	0,11	782
R-143a	HFC	1,1,1-Трифторэтан	47,1	0	4800
R-404a	Смесь HFC R-125/143a/134a (44%/52%/4%)	SUVA HP62, FX70, Genetron 404a, Forane 404a, Solkane 404a	н.д.	0	3700
R-410A	Смесь HFC R-32/125 (50%/50%)	Puron, EcoFluor R410, Genetron R410A, AZ-20	н.д.	0	1890
R-1234yf	HFO	1,3,3,3-тетрафторпропен, Solstice™ 1234yf (Honeywell), Opteon yf (Du Pont)	10,5 дней	0	4
R-1233zd(E)	HCFO	1-хлор-3,3,3-трифторпропен, Solstice™ 1233zd(E), Solstice® LBA (Honeywell)	26 дней	0	1

Продолжение таблицы 5

R-290	НС	Пропан	7 дней	0	20
R-600	НС	Бутан	7 дней	0	0
R-600a	НС	Изобутан	7 дней	0	0
R-717	Неорганическое	Аммиак	н.д.	0	0
R-718	Неорганическое	Вода	н.д.	0	0
R-744	Неорганическое	Углерода диоксид (углекислый газ)	н.д.	0	1

Токсическими эффектами, связанными с углеводородами, являются различные резорбтивные¹ эффекты: наркотические, канцерогенные, мутагенные, тератогенные и т.п. Наибольшей токсичностью обладают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), ПХДД и ПХДФ.

В атмосфере ПАУ довольно устойчивы. Их постепенная трансформация в иные продукты происходит при взаимодействии с озоном (с образованием полиядерных хинонов) и диоксидом азота (продукты – нитробенз(α)пирены, характеризующиеся высокой мутагенной активностью).

Прекрасным адсорбентом для ПАУ и ПХДД/ПХДФ являются сажевые частицы. На 1 см² сажевой поверхности могут разместиться примерно 10¹⁴ молекул ПАУ [1]. При этом образуются т.н. гетерогенные дисперсные частицы, также приобретающие крайне высокую токсичность.

Образование дисперсных частиц и их влияние на окружающую среду

Дисперсные частицы – твёрдые или жидкие частицы дисперсной фазы, содержащиеся в газообразной дисперсионной среде.

Аэрозольные частицы – дисперсные частицы, находящиеся в броуновском движении в атмосферном воздухе и практически не подверженные седиментации. Максимальный размер аэрозольных частиц колеблется от 0,01 до 0,1 мкм в зависимости от их плотности.

Возгоны – дисперсные частицы, образующиеся в результате

¹ Резорбтивное действие — действие токсичных веществ, проявляющееся после всасывания их в кровь.

объёмной конденсации паров веществ.

Основными источниками выбросов дисперсных частиц (ДЧ), связанными с функционированием автомобильного транспорта, являются:

- отработавшие газы двигателей автотранспортных средств (АТС);
- износ автомобильных шин;
- абразивный износ и коррозия материалов в конструкции автомобиля (тормозные механизмы, сцепление и т.п.);
- износ дорожного покрытия;
- пыление при движении АТС по дорогам с грунтовым покрытием и обочинам;
- пыление, связанное с выносом грунта, налипшего на колёса и кузов автомобиля при движении/парковке по территориям без твёрдого покрытия, при выезде на дороги с твёрдым покрытием;
- пыление перевозимого груза, а также процессы его погрузки и разгрузки;
- строительство и ремонт объектов автотранспортного комплекса;
- применение смесей и растворов для борьбы с образованием льда на дорогах;
- процессы уборки дорог и т.п.

Образование ДЧ в камере сгорания ДВС

В терминологии, используемой при сертификации ДВС, для определения ДЧ, улавливаемых из ОГ в ходе проверочных испытаний, используется термин «взвешенные частицы».

Взвешенные частицы – любая субстанция, улавливаемая каким-либо конкретно указанным фильтрующим материалом после разбавления отработавших газов чистым отфильтрованным разбавителем при температуре в пределах 315...325 К (42...52°С); к ним относятся, прежде всего, углерод (сажа), конденсированные углеводороды, нитраты и сульфаты в соединении с водой (рис. 8) [25].

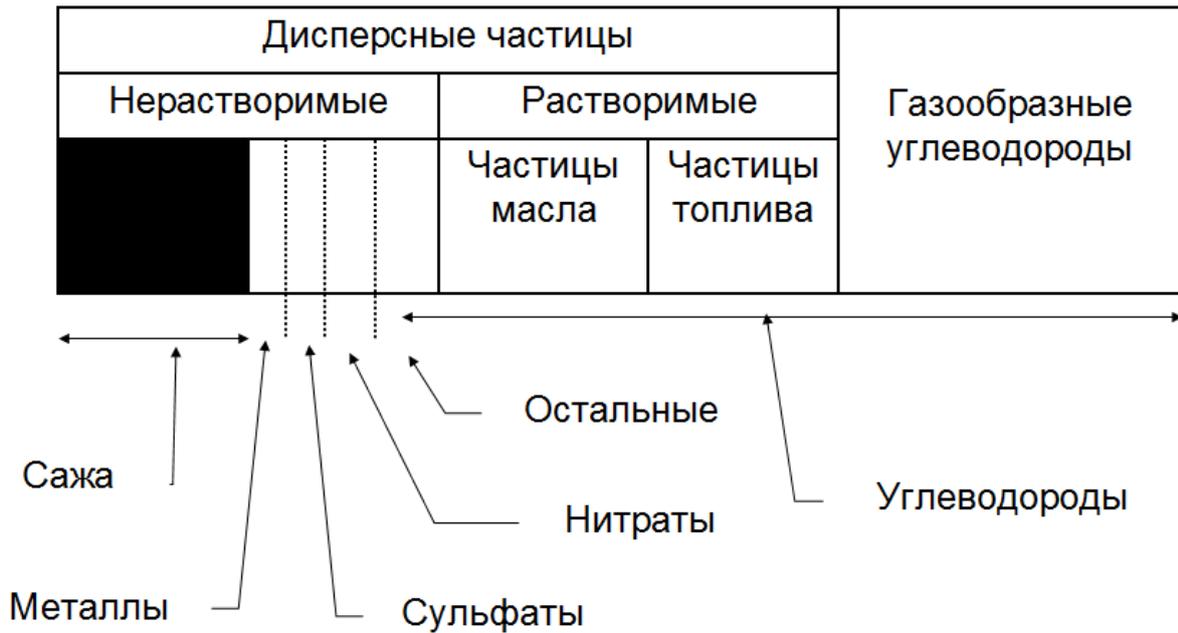


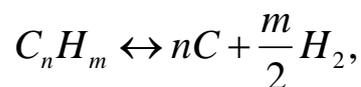
Рис. 8. Состав дисперсных частиц в ОГ ДВС

Сажа (твёрдый углерод) является основным компонентом нерастворимых¹ дисперсных частиц.

Частица сажи – это агломерат пакетов (кристаллитов), которые, в свою очередь, состоят из набора отдельных сеток (пластинок) графитовых шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода (расстояния между ними 1,42 Å), но в отличие от графита слои в саже не плоские, а изогнутые, что и обуславливает сферическую поверхность частиц (рис. 9).

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

Реакция пиролиза углеводородов может быть выражена уравнением



которое, тем не менее, не описывает действительного механизма, приводящего к образованию твёрдого углерода.

¹ В органических растворителях, например, бензоле.

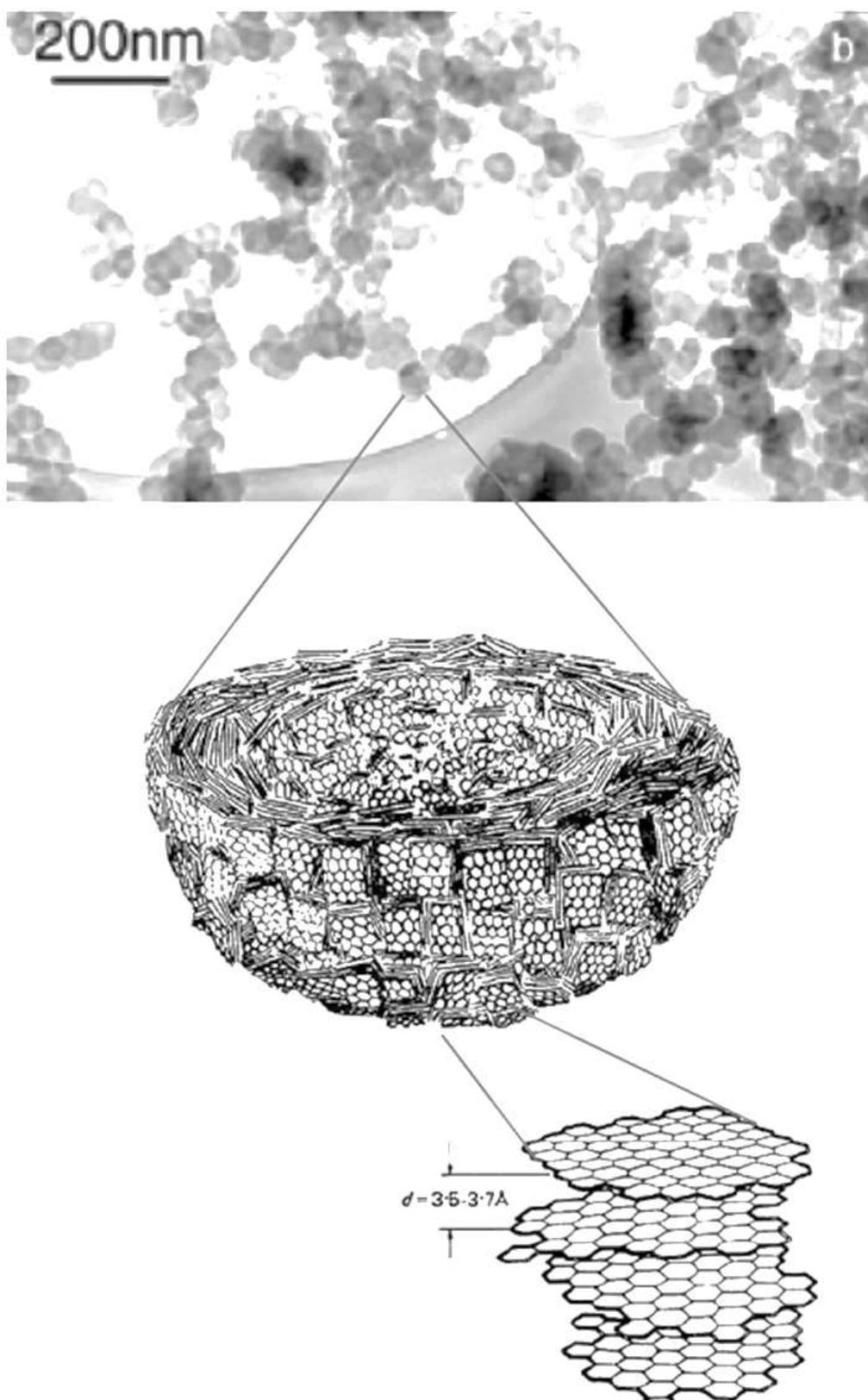


Рис. 9. Частицы сажи и их кристаллическая структура [26]

Формирование итоговой концентрации сажи в процессе сгорания топлива в ДВС может быть разделено на четыре основные фазы [27, 28]:

- 1) образование зародыша;
- 2) рост зародышей в частицы сажи;
- 3) коагуляция первичных сажевых частиц;
- 4) выгорание образовавшихся агломератов.

Выделение сажи из пламени происходит в диапазоне коэффициентов избытка воздуха 0,33...0,7 [29, 30]. При наличии в отрегулированных двигателях с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием (бензиновых, газовых) практически гомогенной рабочей смеси вероятность появления таких обогащенных зон незначительна. Нет условий для роста и коагуляции первичных частиц, так как высокая температура рабочей смеси после прохождения горячего пламени способствует интенсивному выгоранию образовавшейся сажи. У дизелей локальные переобогащённые топливом зоны образуются чаще, и в полной мере реализуются процессы сажеобразования. Поэтому значения концентрации сажи в ОГ дизелей (на выходе из камеры сгорания) являются на порядок бóльшими, чем у двигателей с искровым зажиганием.

Количество образовавшейся сажи в большой степени зависит от температуры в зоне пиролиза углеводородов. С ростом температуры это количество резко увеличивается, так как скорость реакции контролируется её кинетикой. Подобным образом влияет и увеличение давления.

Установлено, что образование сажи зависит от свойств топлива. Чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц [27]. Это можно объяснить тем, что прочность одной и той же связи зависит от длины молекулы. Так, при увеличении числа атомов углерода в молекуле от 2 до 5 прочность связи между группами СН у алканов уменьшается от 333 до 268 кДж/моль [31]. Выявлено также, что концентрации сажи тем больше, чем выше отношение С/Н в топливе [32, 27].

В процессе рабочего такта происходит расширение газов в цилиндре дизеля и к частицам сажи поступает кислород (вследствие

движения газов и диффузии кислорода), т.е. создаются условия, благоприятные для выгорания сажи. Исследования образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля, выполненные методом спектрального анализа [33], показали, что значительная часть сажи выгорает в процессе рабочего такта.

Скорость выгорания сажи значительно меньше скорости выгорания газообразных продуктов неполного сгорания (например, CO). Скорость выгорания сажи существенно зависит от размеров частиц (их поверхности). Было определено, что вся образовавшаяся в камере сгорания сажа может выгореть только в том случае, если размеры частиц не будут превышать 0,01 мкм [34]. В реальности сажа в отработавших газах дизелей представляет собой образования неправильной формы с линейными размерами 0,3...100 мкм. Большая часть сажевых агломератов имеет размеры 0,4...5 мкм [35].

Выделение сажи с отработавшими газами дизеля зависит, следовательно, как от процессов её образования, так и от процессов её выгорания.

В состав дисперсных частиц кроме сажи входят соединения практически всех металлов, которые попадают в топливо или моторное масло вместе с присадками и примесями, а также при его контакте с металлическими поверхностями. Так, моющие присадки, представляющие собой металлоорганические соединения, при сгорании образуют золу из оксидов и солей металлов. Зола забивает поры сажевого фильтра и препятствует его регенерации.

На образование дисперсных частиц влияет наличие серы в топливе. Чем больше в топливе серы, тем выше выбросы сульфатов и связанной с ними воды, доля которых в составе дисперсных частиц может составлять 20%. Сера и фосфор содержатся также в противоизносных и антиокислительных присадках к моторному маслу. Современные масла содержат всё меньше таких присадок, а их функции обеспечивают новые виды базовых масел на основе синтезируемых полимеров. Базовые масла обеспечивают смазывающие, температурные, щелочные свойства, способность связывать сажу и т.п.

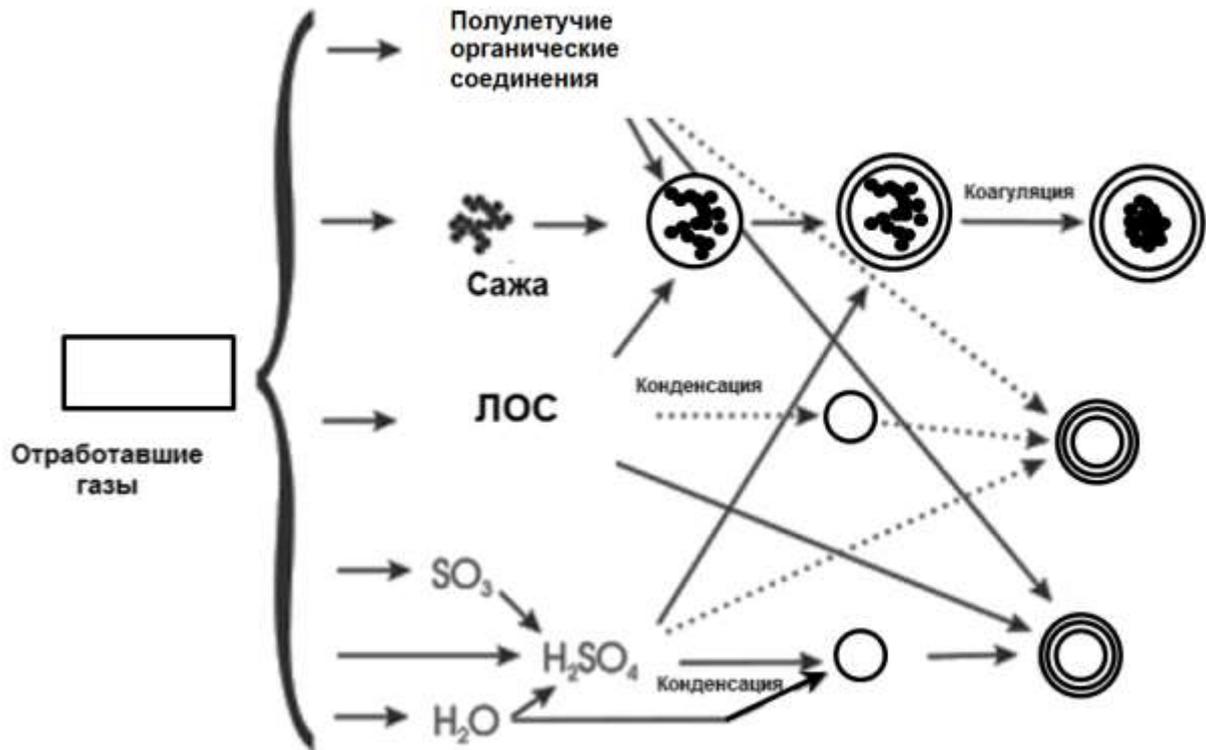


Рис. 10. Схема образования ДЧ в ОГ ДВСВС [36]

Оксиды азота NO_x , содержащиеся в ОГ ДВС, могут реагировать с кислородом и водой, образуя азотную кислоту, которая, в свою очередь, реагируя с металлами или их оксидами, образует нитраты. Следовательно, количество нитратов в составе ДЧ зависит от образования NO_x и наличия металлических частиц в ОГ.

Упрощённая схема формирования ДЧ в ОГ ДВС включает в себя процессы формирования первичных ядер конденсации, состоящих из сажи, ЛОС, сульфатов и нитратов, и последующего роста ДЧ в процессах конденсации, адсорбции и коагуляции (рис. 10).

В ДВСВС максимальные концентрации ДЧ образуются на режимах максимальных нагрузок и малых частот вращения (рис. 11). Именно в этой зоне сочетаются факторы, определяющие образования ДЧ, – большая порция впрыскиваемого топлива, относительно низкая скорость движения воздуха в камере сгорания, высокая температура и давление в камере сгорания. По мере уменьшения нагрузки порция впрыскиваемого топлива начинает снижаться, что приводит к уменьшению значений температуры и давления рабочего цикла и, следовательно, к снижению образования ДЧ. По мере увеличения частоты вращения растёт

относительная скорость движения воздуха в камере сгорания, что приводит к увеличению турбулизации заряда, лучшему перемешиванию и сгоранию смеси, что приводит к уменьшению образования ДЧ.

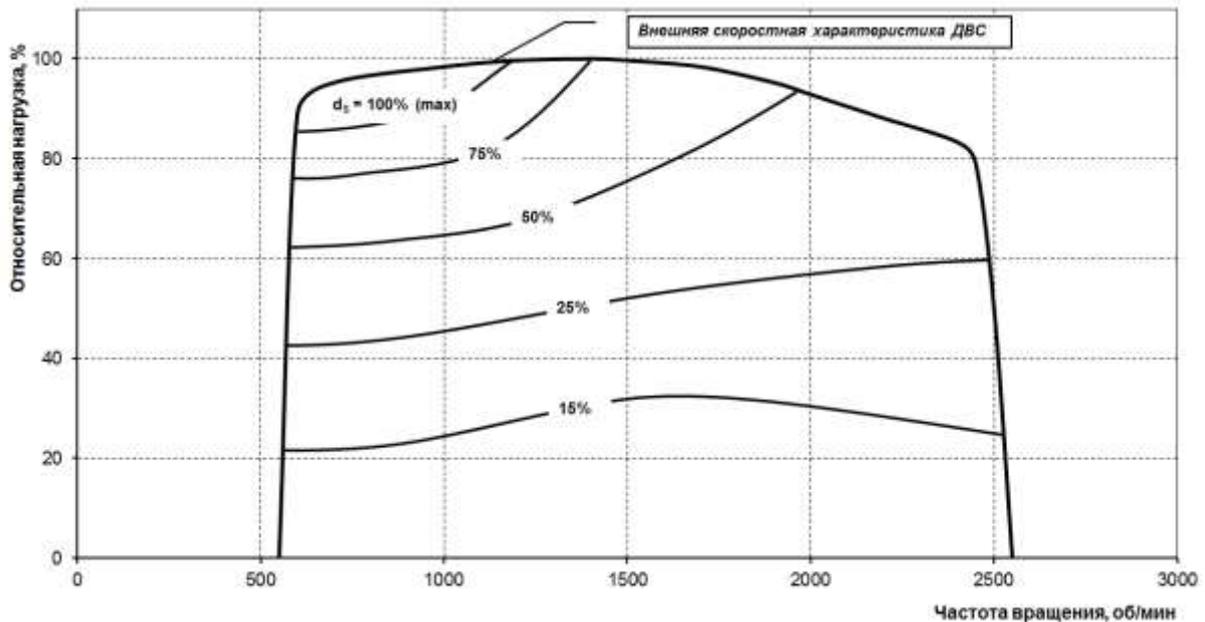


Рис. 11. Типичная многопараметровая характеристика ДВСВС (уровня ЕВРО-1) по концентрации в ОГ сажи, $г/м^3$ [37]

Режим работы двигателя оказывает большое влияние и на химический состав ДЧ, например, доля элементарного углерода (сажи или «чёрного углерода») может меняться от 46% до 79% (рис. 12).

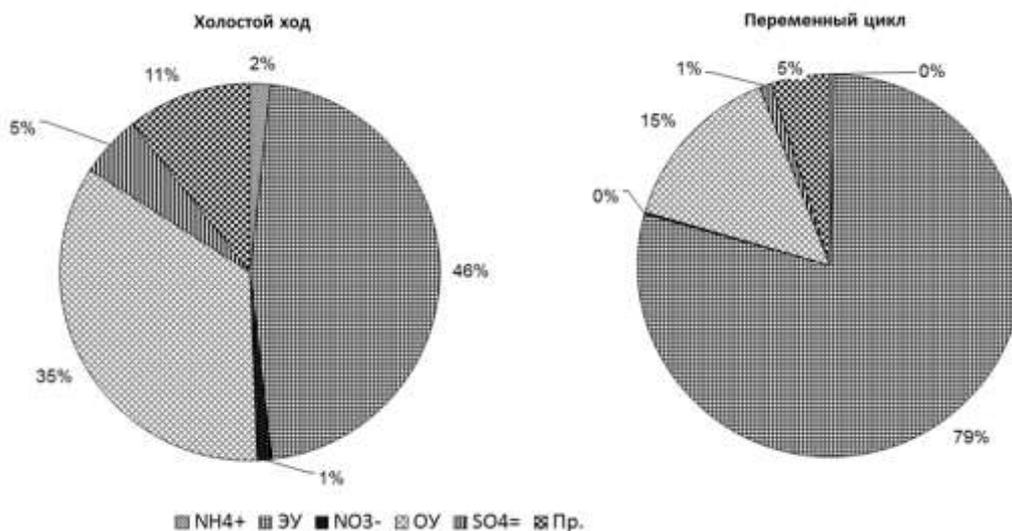


Рис. 12. Зависимость химического состава ДЧ в ОГ ДВСВС от режима его работы (холостой ход и переменный цикл). Источник: SPECIATE (США)

Образование ДЧ от износа автомобильных шин

В результате взаимодействия колеса с дорожным покрытием образуются ДЧ, представляющие собой продукты износа материалов шины и дорожного покрытия. В обоих случаях основным механизмом образования ДЧ служат срезающие усилия, возникающие во время относительного перемещения поверхностей шины и дорожного полотна. Вторичным механизмом является испарение материалов с поверхности трения/скольжения при высоких температурах, характерных для трения.

Износ шин является комплексным физико-химическим процессом. Различают три основных вида износа шин [38]:

- усталостный (гистерезисный или механо-химический),
- абразивный и
- посредством «скатывания».

При **усталостном износе** разрушение поверхностного слоя протектора шины происходит после его многократных деформаций в результате качения колеса под нагрузкой. В результате многократно повторяющихся воздействий происходит разрушение и отделение частиц износа с поверхности трения. Такой процесс разрушения поверхности трения рассматривается как фрикционно-контактная усталость материала. Этот вид износа является основным для автомобильных шин.

Абразивный износ происходит при трении двух поверхностей и проявляется в образовании на поверхности протектора раздиров и трещин в результате резкого и длительного торможения или разгона автомобиля, при движении с большими скоростями, на поворотах.

У мягких резин, особенно при повышенных нагрузках, наблюдается предрасположенность к износу посредством **скатывания**. При скатывании образуется рисунок истирания, состоящий из системы параллельных чередующихся гребней и впадин, расположенных перпендикулярно направлению истирания.

На интенсивность износа шин влияют следующие факторы: конструкция шины, рисунок протектора, состав резины, скорость движения, техническое состояние подвески автомобиля, нагрузка на колесо, давление воздуха в шине, температура окружающего воздуха и шины, стиль вождения, тип и состояние дорожного покрытия, наличие осадков и т.п.

Суммарное количество материала износа шины на протяжении её срока службы варьируется в зависимости от конкретного транспортного средства и может составлять от нескольких сот грамм для двухколесных транспортных средств, 1...1.5 кг для легковых автомобилей и вплоть до 10 кг для грузовиков или автобусов.

Частицы от износа шин в основном состоят из соединений, которые используются при их производстве: бутадиенстирольный каучук ($\approx 75\%$), натуральный каучук ($\approx 15\%$) и полибутадиен ($\approx 10\%$). В целях получения необходимых эксплуатационных характеристик во время производственного процесса в это сочетание также добавляются металлические или органические присадки. Одной из самых важных присадок является окись цинка (ZnO), выступающая в качестве вулканизирующей добавки [39]. В соответствии с данными, представленными в работе [40], обычно концентрация ZnO в протекторе покрышки варьируется в диапазоне от 1,2% (легковые автомобили) до 2,1% (грузовики).

Средние данные по составу шинной пыли из работы [41] внесены в базу данных SPECIATE, созданную Агентством по охране окружающей среды США с целью накопления и упорядочения многочисленных данных, касающихся состава ДЧ различного происхождения (рис. 13).

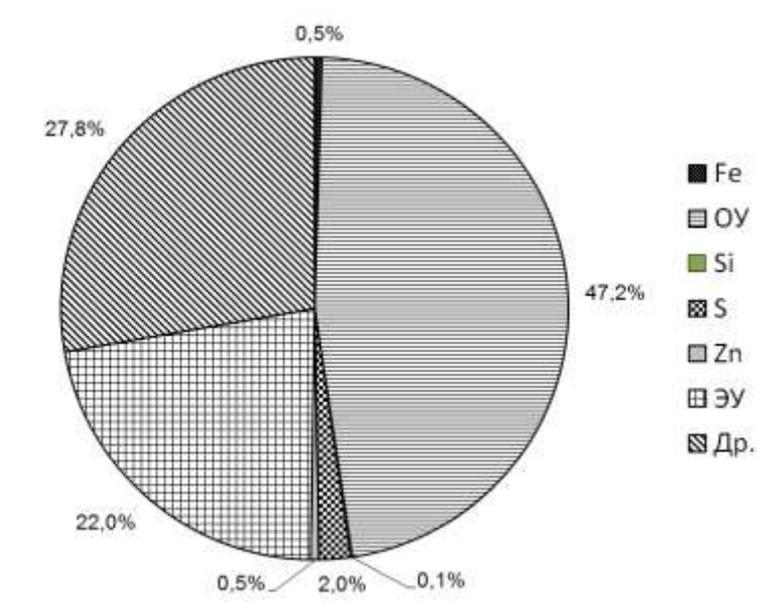


Рис. 13. Усреднённые данные по химическому составу шинной пыли, полученные в США в конце 1990-х

В составе ДЧ от износа шин обнаруживают бензо(α)пирен, входящий в перечень Протокола по стойким органическим загрязнителям ЕЭК ООН ($\approx 3,9$ млн⁻¹).

В середине 1970-х началось использование в резиновых смесях т.н. **силики** – высокодиспергированного диоксида кремния, модифицированного присадками, повышающими его адгезию с каучуками. С середины 1990-х началось массовое производство шин (особенно зимних) с силикой. Силика вводится в состав протекторных резин с целью одновременного улучшения сцепных качеств и снижения сопротивления качению¹. Одна из первых торговых марок силики, производимая фирмой Degussa с 1971 года – S-69 или бис-3-(триэтоксилпропил)-тетрасульфат $((C_2H_5O)_3 - Si - CH_2 - CH_2 - CH_2 - Sx - CH_2 - CH_2 - CH_2 - Si - (OC_2H_5)_3)$.

Одна из наиболее широко известных современных марок силики – SCA 9872 – состоит на 72% из силана² и на 28% из силиката кальция.

Доля силики, заменяющей технический углерод, может быть различной и даже достигать до 100%, однако в этом случае для улучшения электропроводимости резины в состав смеси добавляют специальные добавки, например смесь amino- и сульфонилцирконатов [42].

Химический и гранулометрический состав пыли, образующейся при истирании шин с силикой, автору найти не удалось. Можно лишь предположить, что часть элементарного углерода будет заменена диоксидом кремния. Учитывая, что диоксид кремния – наиболее вероятная причина такого опасного заболевания, как силикоз, в этой области необходимы дополнительные исследования.

Образование ДЧ от износа тормозных механизмов АТС

ДЧ, образующиеся в результате износа тормозных механизмов представляют собой продукты износа материалов фрикционных накладок и металла, из которого изготовлены тормозные диски или тормозные барабаны.

¹ Силика также входит в состав мастик, используемых для нанесения дорожной разметки.

² Соединения кремния с водородом общей формулы Si_nH_{2n+2} .

Тормозные фрикционные накладки обычно состоят из четырех основных компонентов — обвязки, волокон, уплотняющих присадок и модификаторов трения.

В качестве обвязок используются различные модифицированные фенолформальдегидные смолы.

Волокна могут быть подразделены на металлические, минеральные, керамические или арамидные (органические) и включают сталь, медь, латунь, титанат калия, стекло, асбест, органический материал и кевлар.

Уплотняющие присадки обычно являются дешевыми материалами, такими как барий и серноокислая сурьма, каолиновые глины, магний, оксиды хрома и металлические порошки.

Состав модификаторов трения может быть неорганическим, органическим или металлическим. Основным модификатором трения является графит, но помимо него также используются порошок акажу¹, резиновая мука и технический углерод. В прошлом тормозные накладки дисковых тормозов включали асбестовые волокна, но на сегодняшний день в Европейском автопарке практически не осталось транспортных средств, в которых используется эта технология.

На величину износа тормозов большое влияние оказывает конструкция как автомобиля в целом (расположение центра тяжести, количество осей и т.п.), так и собственно тормозной системы, материал фрикционных накладок и тормозных дисков/барабанов. Показатели интенсивности износа также зависят от стиля вождения, степени загруженности автомобиля, типа ездового цикла (городской, пригородный, магистральный и т.п.), продольного профиля дороги, влажности воздуха и наличия осадков, состояния дорожного покрытия (наличия абразивных частиц) и других факторов.

Предполагается, что срок службы тормозных фрикционных накладок для легковых автомобилей составляет 30...50 тыс. км, для грузовиков и туристических междугородних автобусов составляет около 60 тыс. км.

¹ Необыкновенно твердое, светло-красное дерево, растущее в Африке и в Индии.

Не весь изношенный материал тормозных механизмов выбрасывается в воздух в виде ДЧ. Небольшое количество тормозной пыли остаётся (оседает) на транспортном средстве. Степень выброса/оседания зависит от конструкции тормозных механизмов (дисковые или барабанные), интенсивности торможения, скорости, при которой происходит торможение, состояния поверхностей деталей автомобиля (влажность, замасливание) и т.п. При этом от 35 до 90% материала суммарного износа выбрасывается в атмосферу. По данным [43] около 35% массы частиц износа тормозов выбрасывается в атмосферу. Но эта оценка не учитывала потери во время отбора проб. В том случае, если они были бы учтены, то выброшенная в атмосферу фракция PM_{10} составила бы уже около 64% [44]. По данным [45] 10% тормозной пыли остается на кожухе барабанных тормозных механизмов. От 3% до 30% остатков ДЧ тормозов остается на дороге, от 16 до 22% остается на колесе, а от 8 до 25% – на тормозном и рулевом/подвесном оборудовании [44].

В соответствии с данными Агентства по охране окружающей среды США [46] и результатами работы [47], около 98% (по массе) ДЧ от износа тормозов являются PM_{10} , которые по гранулометрическому составу распределяются следующим образом: $PM_{2.5}$ – 40%, PM_1 – 10%, $PM_{0.1}$ – 8%. По данным [48] массовые доли фракций ДЧ износа тормозов размером менее 10 мкм, 2.5 мкм и 0.1 мкм, составляют 88%, 63% и 33% соответственно. По данным [44] доля PM_{10} составила 80%, а доля PM_1 – 2%. По данным [49] вклад износа тормозов фиксировался в основном во фракции PM_{10} , а доля $PM_{2.5}$ в этих PM_{10} составила только 5...17%.

Таким образом, при нормальных условиях вождения большая часть ДЧ износа тормозов может рассматриваться в качестве PM_{10} , а значительная часть – в качестве $PM_{2.5}$. Существует вероятность того, что при высоких температурах, вызванных торможением, некоторое количество материала тормозных накладок дисковых тормозов может испаряться с последующей конденсацией и, таким образом, вносить вклад в тонкодисперсную фракцию ДЧ.

Химический состав ДЧ, образующихся в результате износа тормозных механизмов, в большой степени зависит от их производителя, применения (легковой, грузовой, гоночный автомобиль и т. д.) и заданных

свойств. Как правило, тормозные накладки состоят из металлов, связанных друг с другом с помощью материалов на основе кремния. Однако встречается и другая рецептура. Кроме того, пока не существует единого подхода к проведению данных исследований. Поэтому результаты анализа химического состава ДЧ от износа тормозных механизмов, произведённые разными авторами, отличаются большим разбросом (табл. 6).

Таблица 6

Химический состав ДЧ от износа тормозных механизмов по данным SPECIATE (США)

Химический состав ДЧ	Обозначение	Массовая доля, %		
		Мин.	Макс.	Сред.
Барий	Ba	0,92	12,16	5,62
Медь	Cu	0,04	14,09	3,41
Элементарный углерод	ЭУ	0,21	2,61	1,14
Железо	Fe	4,00	52,91	27,78
Магний	Mg	1,91	13,80	3,94
Органический углерод	ОУ	8,79	33,81	11,34
Кремний	Si	1,03	13,14	5,23
Сера	S	0,64	4,23	2,06

В составе ДЧ от износа тормозных механизмов обнаруживают и некоторые СОЗ: бензо(α)пирен ($\cong 0,74$ млн⁻¹), бензо(β)флуорантен ($\cong 0,42$ млн⁻¹), бензо(к)флуорантен ($\cong 0,62$ млн⁻¹) и т.п.

Влияние ДЧ на окружающую среду и здоровье населения

ДЧ имеют сложный химический состав и распределяются на группы в зависимости от их размера (рис. 14). Каждая размерная группа имеет специфические характеристики поведения в атмосфере и проникающей способности в организм человека. Наиболее опасными с этих точек зрения являются ДЧ, размером менее 2,5 мкм.

Токсичность ДЧ определяется их способностью адсорбировать на своей поверхности различные углеводороды, в том числе относящиеся к канцерогенам.

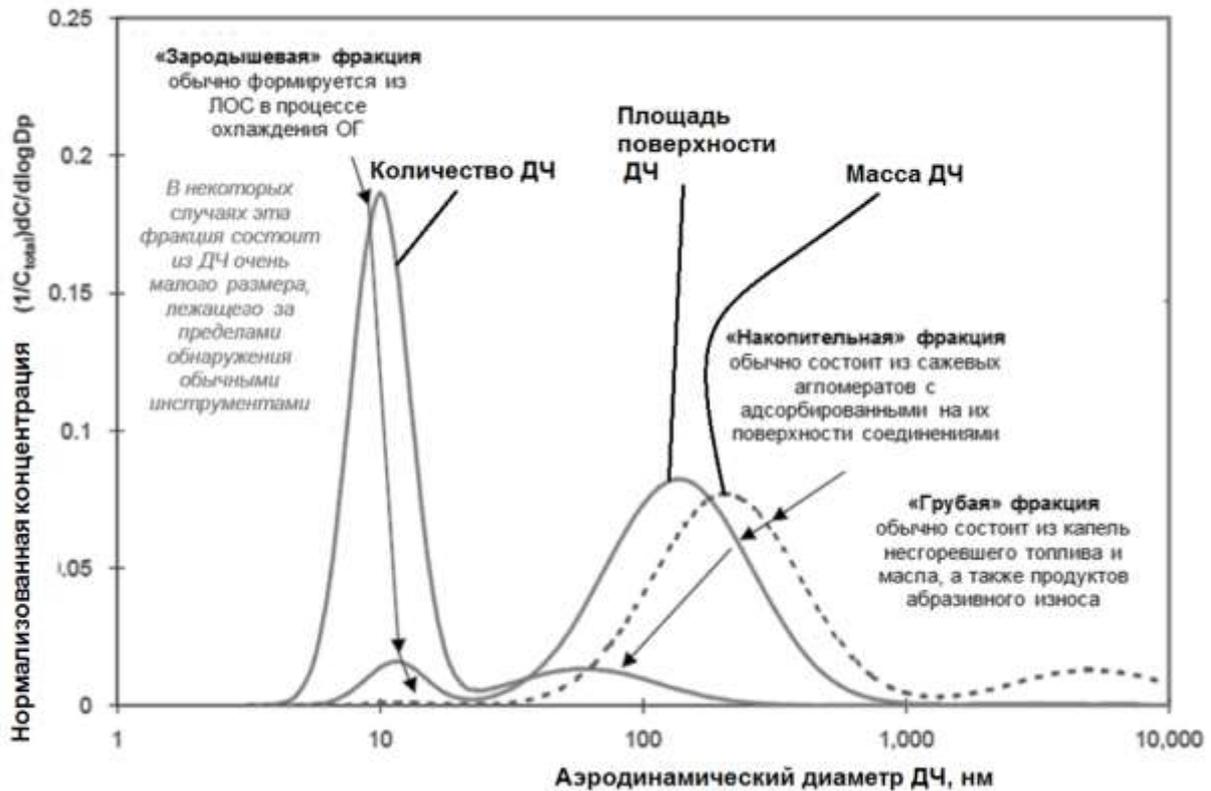


Рис. 14. Распределение типичных придорожных ДЧ по количеству, площади поверхности и массе [50]

Кроме того, ДЧ могут оказывать различное влияние на оптические свойства атмосферного воздуха, ослабляя или усиливая «парниковый» эффект.

Образование SO_2 и его влияние на окружающую среду

Выбросы **серы диоксида** SO_2 напрямую связаны с содержанием серы в топливах.

Уголь, в зависимости от месторождения, содержит от 0,2 до 5,5% серы по массе, нефть – от 0,07 до 5%, мазут – не более 3,5%. Максимальное содержание серы в отечественных сортах автомобильного бензина и дизельного топлива зависит от экологического класса (см. табл. 7 и 8) [17]. Правда, это связано, в первую очередь, с необходимостью обеспечить требуемую долговечность и надёжность работы каталитических нейтрализаторов отработавших газов.

Таблица 7

Требования к содержанию серы в автомобильном бензине

Характеристики автомобильного бензина	Единица измерения	Нормы в отношении экологического класса			
		К2	К3	К4	К5
Массовая доля серы, не более	мг/кг	500	150	50	10

Таблица 8

Требования к содержанию серы в дизельном топливе

Характеристики дизельного топлива	Единица измерения	Нормы в отношении экологического класса			
		К2	К3	К4	К5
Массовая доля серы, не более	мг/кг	500	350	50	10

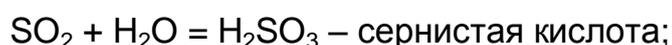
Массовое содержание серы в отечественном топливе для реактивных двигателей летательных аппаратов с дозвуковой скоростью полета не должно превышать: 0,25% – для топлива «Джет-А1» и 0,2% – для топлива «ТС-1». Массовая доля серы в топливе для реактивных двигателей летательных аппаратов со сверхзвуковой скоростью полета не должно превышать 0,1%. Массовая доля общей серы в отечественном авиационном бензине не должна превышать 0,03% [17].

Массовая доля серы в отечественном судовом топливе не должна превышать 3,5% (по 31 декабря 2011 г.), 2% (по 31 декабря 2012 г.), 1,5% (с 1 января 2013 г.), 0,5% (с 1 января 2020 г.) [17].

Трансформации SO₂ в атмосфере

Время существования SO₂ в атмосфере зависит от метеорологических условий, в среднем оно составляет от 3 до 5 дней.

SO₂, поступая в атмосферный воздух, окисляется кислородом воздуха до трехоксида, которая сразу же реагирует с водяными парами, образуя сернистую кислоту, которая, постепенно окисляясь, превращается в серную кислоту:



Большая часть SO_2 превращается в серную кислоту в течение нескольких дней после её выброса в атмосферу. Следовательно, SO_2 может переноситься воздушными массами на сотни километров от источника выброса.

Влияние SO_2 на окружающую среду и здоровье населения

Серы диоксид легко растворяется в воде с образованием серной и сернистых кислот, которые раздражают слизистые оболочки глаз, гортани и лёгких при дыхании. По этой же причине SO_2 относится к соединениям, закисляющим окружающую среду.

Контрольные вопросы по разделу

1. Чем определяется стехиометрический состав рабочей смеси, сгораемой в ДВС?
2. Что такое коэффициент избытка воздуха? Какими значениями этого коэффициента определяется «бедная» и «богатая» рабочая смесь, смесь «мощностного» и «экономичного» состава?
3. Как осуществляется регулирование мощности в ДВСПВ и ДВСВС?
4. Что понимается под термином «режим работы ДВС»? Чем «установившиеся» режимы отличаются от «неустановившихся»?
5. Какую информацию можно получить из многопараметровой характеристики ДВС?
6. Как изменяется удельный эффективный расход топлива в зависимости от режима работы ДВС?
7. Каков механизм образования CO_2 в ДВС?
8. Как определить выбросы CO_2 методом «баланса углерода»?
9. В чём проявляется негативное влияние CO_2 на окружающую среду и здоровье человека?
10. Каков механизм образования CO в ДВС?
11. Как изменяется концентрация CO в ОГ в зависимости от режима работы ДВС?
12. В чём проявляется негативное влияние CO на окружающую среду и здоровье человека?
13. Каков механизм образования «топливного» NO в ДВС?
14. Каков механизм образования «термического» NO в ДВС?

15. Каков механизм образования «быстрого» NO в ДВС?
16. Как изменяется концентрация NO_x в ОГ в зависимости от режима работы ДВС?
17. Каким образом происходит трансформация NO_x в атмосфере?
18. В чём проявляется негативное влияние NO_x на окружающую среду и здоровье человека?
19. Каков механизм образования топливных испарений в ДВС?
20. Каков механизм образования несгоревших СН в ДВС?
21. Каков механизм образования альдегидов и ПАУ в ДВС?
22. Каковы источники выбросов ОРВ при производстве, эксплуатации и утилизации автомобилей?
23. Каков механизм образования диоксинов и фуранов в ДВС?
24. В чём проявляется негативное влияние СН на окружающую среду и здоровье человека?
25. Каков механизм образования ДЧ в ДВС?
26. Каков механизм образования ДЧ от износа автомобильных шин?
27. Каков механизм образования ДЧ от износа тормозных механизмов?
28. В чём проявляется негативное влияние ДЧ на окружающую среду и здоровье человека?
29. Каков механизм образования SO₂ в ДВС?
30. Каким образом происходит трансформация SO₂ в атмосфере?
31. В чём проявляется негативное влияние SO₂ на окружающую среду и здоровье человека?

МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВС С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Методы совершенствования рабочего процесса двигателей с принудительным воспламенением рабочей смеси (ДВС ПВ)

Для уменьшения выделения NO_x с ОГ ДВС ПВ практически имеются два пути:

- снижение максимальной температуры в процессе сгорания рабочей смеси,
- проведение процесса сгорания рабочей смеси с недостатком кислорода в зоне продуктов сгорания.

Для уменьшения выделения токсичных продуктов неполного сгорания с ОГ ДВС ПВ, а также для сокращения расхода топлива и выбросов CO_2 необходимо:

- обеспечивать работу двигателя в большей части используемых режимов работы на обеднённой смеси;
- улучшать качество смесеобразования (гомогенизацию смеси, распределение топливовоздушной смеси по отдельным цилиндрам, по последовательным рабочим циклам);
- уменьшать объём топливовоздушной смеси в зонах гашения пламени – у стенок камеры сгорания, в «мёртвых» объёмах, образуемых зазорами между сопрягаемыми деталями;
- не допускать сильного разбавления свежей порции топливовоздушной смеси остаточными газами;
- принимать меры для увеличения КПД двигателя и т.п.

Представленное на рис. 15 разделение применяемых в современных ДВС ПВ технологий по основным достигаемым результатам носит несколько условный характер, поскольку в действительности влияние этих технологий на характеристики ДВС ПВ имеет более сложный характер. Однако данная схема позволяет наглядно оценить основные причины применения той или иной технологии.

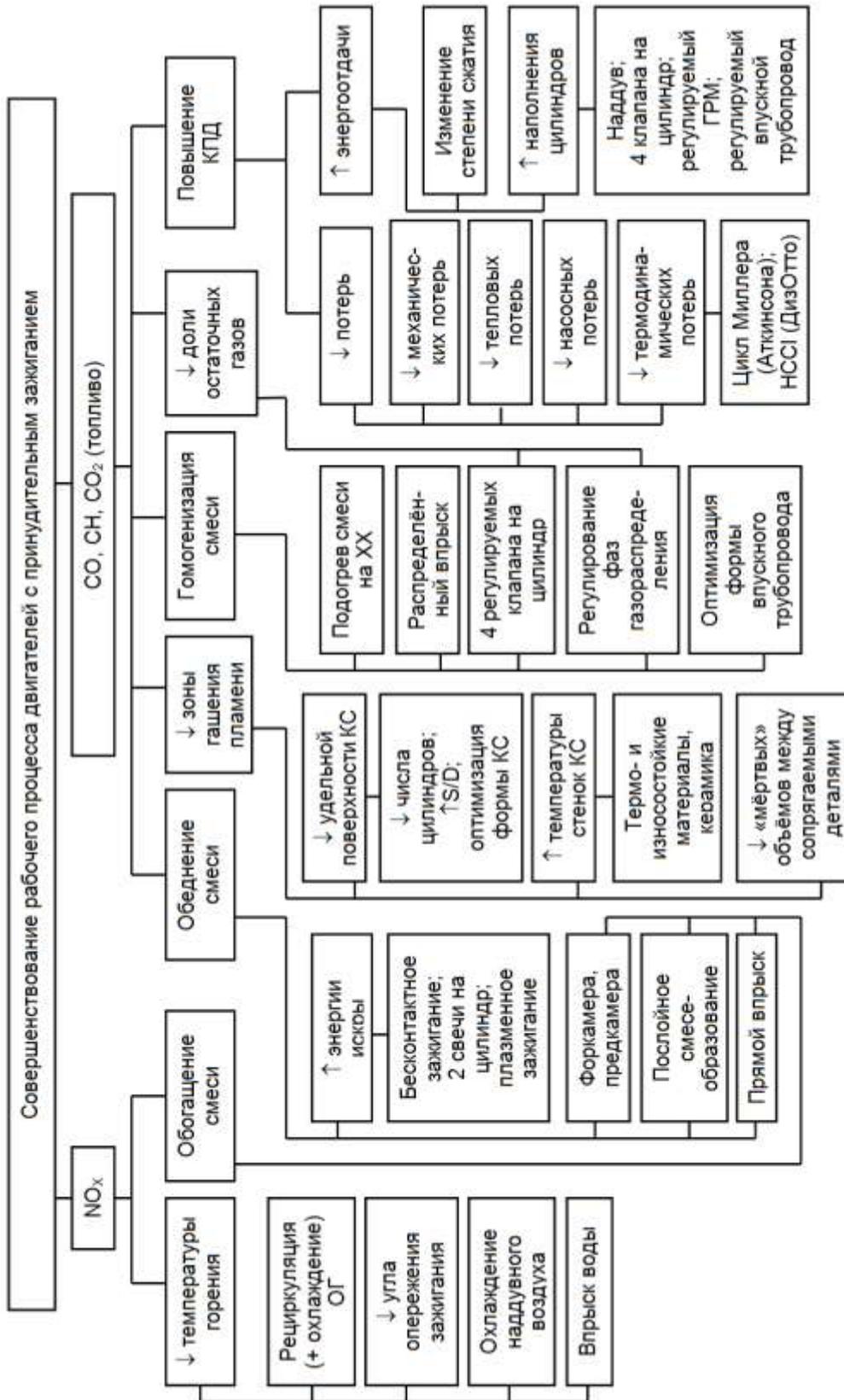


Рис. 15. Методы совершенствования рабочего процесса двигателей с принудительным воспламенением рабочей смеси (ДВСПВ)

Методы совершенствования рабочего процесса двигателей с воспламенением рабочей смеси от сжатия (ДВСВС)

Основными токсичными компонентами отработавших газов ДВСВС являются окислы азота NO_x и дисперсные частицы, состоящие, главным образом из сажи.

Пути воздействия на процесс образования NO_x практически те же, что и в ДВСПВ, различие состоит лишь в том, что дизели при любом типе смесеобразования в условиях нормальной эксплуатации работают при $\alpha > 1,3 \dots 1,5$, поэтому уменьшить концентрацию кислорода в зоне сгорания можно только локально, т. е. при организации расслоения смеси.

Выделение сажи дизелями можно сократить двумя путями: уменьшением образования сажи и улучшением условий её выгорания в процессе расширения. На оба этих процесса можно оказывать влияние за счёт оптимизации законов смесеобразования и сгорания в цилиндре. Оптимизация предусматривает организацию интенсивного вихря в камере сгорания, обеспечение мелкодисперсного распыления топлива, «фазированный¹» впрыск, электронное управление зависимостью количества впрыскиваемого топлива от режима работы двигателя, параметров окружающего воздуха и других факторов.

Схематично все мероприятия, направленные на снижение выброса загрязняющих веществ ДВСВС представлены на рис. 16.

¹ Изменение количества впрыскиваемого топлива в зависимости от угла поворота коленчатого вала в фазе впрыска.

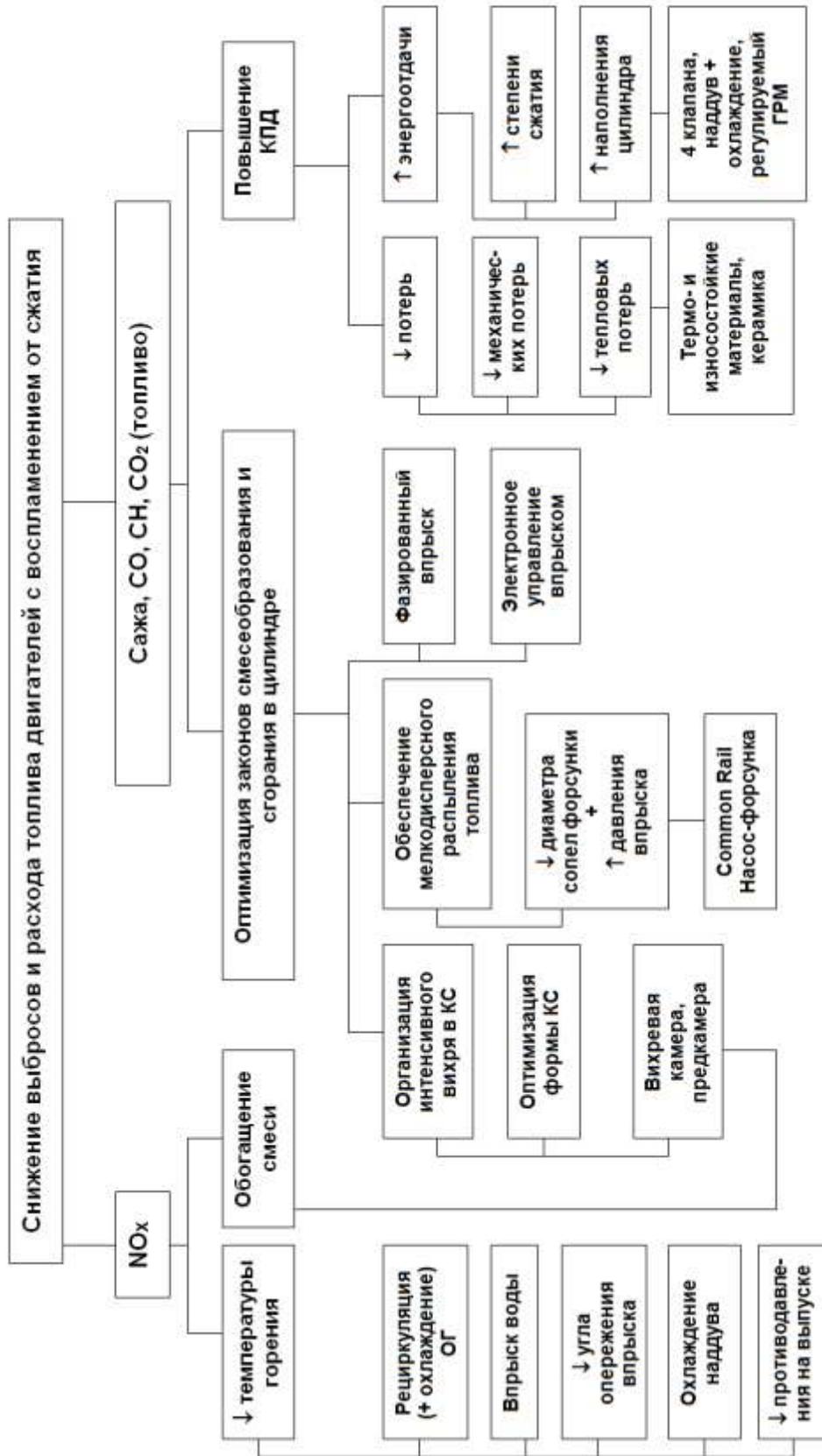


Рис. 16. Методы совершенствования рабочего процесса ДВС с воспламенением от сжатия (ДВСВС)

Рециркуляция отработавших газов

Для уменьшения выделения NO в настоящее время широко применяется рециркуляция отработавших газов, т.е. возврат части ОГ обратно в цилиндр на следующем рабочем цикле. При этом уменьшается максимальная температура рабочего цикла. Снижение температуры происходит вследствие уменьшения цикловой подачи топлива (уменьшается количество свежей топливовоздушной смеси), а также из-за бóльшей удельной теплоёмкости продуктов сгорания по сравнению с воздухом (ОГ «забирают» на себя больше энергии, выделяющейся при сгорании топлива, чем воздух). Кроме того, наличие ОГ в цилиндре оказывает некоторое влияние на процесс сгорания. Уменьшение температуры влияет на концентрацию атомарного кислорода, что, в свою очередь, снижает скорость реакции образования NO.

Для ДВСПВ известны две принципиально возможные схемы рециркуляции. Первая схема, называемая «внешней» рециркуляцией ОГ, заключается в перепуске некоторого количества ОГ из выпускного во впускной трубопровод в процессе такта впуска. Вторая схема, называемая «внутренней» рециркуляцией ОГ, обеспечивается за счёт регулирования фаз газораспределения, а именно за счёт регулирования степени перекрытия клапанов в конце такта выпуска и начале такта впуска. Такое регулирование позволяет «оставить» в камере сгорания некоторое количество ОГ.

Существуют различные схемы «внешней» рециркуляции ОГ в ДВСПВ, но обычно ОГ во впускной трубопровод подаются за дроссельной заслонкой (в зоне разряжения), т.к. для того, чтобы ОГ начали поступать через клапан системы рециркуляции ОГ, необходимо, чтобы между впускным трубопроводом и выпускным коллектором существовал перепад давлений. Внешняя рециркуляция повышает температуру в зоне впускных клапанов, провоцируя образование отложений. Борьбу с этим можно введением в бензин специальных моющих присадок.

В ДВСВС разница давлений создаётся за счёт работы турбокомпрессора. В этом случае ОГ охлаждаются в теплообменнике системы рециркуляции ОГ и затем направляются во впускной трубопровод перед турбокомпрессором (в зону всасывания), где

создаётся разрежение. В безнаддувных дизелях для осуществления рециркуляции ОГ могут применяться конфигурации впускного трубопровода в виде сопла Вентури. В этом случае разрежение создаётся в сужении последнего, куда и организуется подача ОГ из выпускной системы.

Для повышения эффективности рециркуляции иногда используют охлаждение перепускаемых ОГ и уменьшение угла опережения зажигания (или впрыска).

Система рециркуляции ОГ используется для снижения расхода топлива и уменьшения выбросов NO в том числе и в ДВС ПВ с непосредственным впрыском. Благодаря рециркуляции ОГ выбросы NO в условиях работы на обеднённых смесях снижаются настолько, что иногда можно обойтись без применения мер очистки ОГ. Но двигатели с непосредственным впрыском практически не дросселируются на режимах малых нагрузок. Кроме того, при работе на сверхобеднённой смеси через клапан системы рециркуляции ОГ во впускной трубопровод направляется значительное количество оставшегося в ОГ кислорода. Это требует определенного алгоритма управления, который бы координировал работу дроссельной заслонки и клапана системы рециркуляции ОГ. Поэтому к системе рециркуляции ОГ предъявляются повышенные требования: она должна работать точно и надёжно, а также препятствовать образованию отложений, которые могут образовываться в системе выпуска при низких температурах ОГ.

Степень рециркуляции ОГ регулируется специальным клапаном. Клапан рециркуляции управляется в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала. Степень рециркуляции для легковых автомобилей составляет примерно 50%, для грузовых автомобилей 5...25%. Максимальный перепуск соответствует режимам работы при 50...75%-ной нагрузке. Поскольку степень рециркуляции влияет на количество свежего заряда в цилиндре, то на максимальных нагрузках её уменьшают практически до нуля с тем, чтобы не ухудшать мощностные характеристики двигателя (рис. 17).

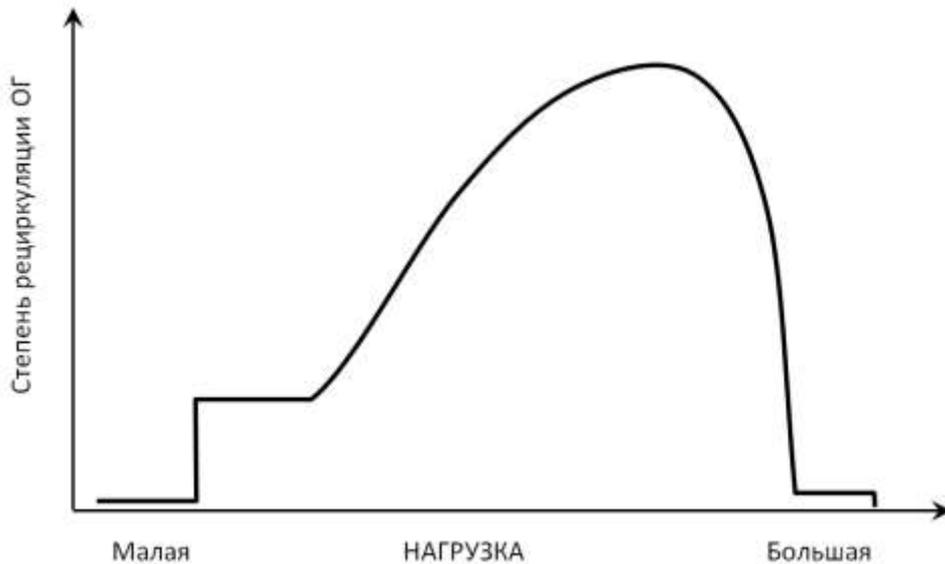


Рис. 17. Зависимость между степенью рециркуляции и нагрузкой на двигатель

Рециркуляция 10% отработавших газов в ДВСПВ уменьшает выделение NO_x на 30...50% [13].

За счёт рециркуляции ОГ можно улучшить показатели экономичности двигателя на малых и средних нагрузках. Поскольку при рециркуляции ОГ уменьшается количество подаваемого в цилиндр свежего заряда, и, следовательно, мощность двигателя снижается, то для её восстановления приходится приоткрывать дроссельную заслонку. Это означает, что заданный нагрузочный режим реализуется с меньшими насосными потерями, следствием чего является более низкий расход топлива.

При рециркуляции ОГ, вследствие разбавления топливовоздушного заряда продуктами сгорания, процесс сгорания протекает несколько хуже, поэтому концентрации CO и CH в отработавших газах немного увеличиваются. Необходимо предпринимать специальные меры для их уменьшения.

Специальные исследования показали [51], что перепуск части ОГ во впускную систему не только уменьшает выделение NO_x , но и существенно снижает износ поршневых колец двигателя. Рециркуляция 12% отработавших газов при работе двигателя в условиях, имитирующих городское движение, привела к уменьшению износа поршневых колец примерно на 50%. Износ поршневых колец зависит от максимальной

температуры цикла. Однако физическая сущность процессов, приводящих к уменьшению износа, пока ещё не объяснена. Возможно, это связано с уменьшением коррозионного износа колец из-за уменьшения концентрации NO_x .

При подаче ОГ на впуск в дизелях в некоторых случаях было получено существенное уменьшение выделения NO_x , однако при этом ухудшались экономические показатели дизелей (за исключением режимов малых нагрузок). Наибольшее относительное уменьшение концентрации NO_x наблюдается при малых и средних нагрузках. При больших нагрузках эффект от рециркуляции ОГ значительно меньше. Кроме того, рециркуляция увеличивает расход топлива, выделение сажи, СО и СН. Уменьшение выделения NO_x на 50% сопряжено для предкамерного дизеля с ухудшением экономичности примерно на 7%.

Опыты показали, что рециркуляция отработавших газов в двухкамерных дизелях меньше влияет на выделение NO_x , чем в однокамерных.

Увеличение энергии искры

Организация работы ДВСПВ на бедных смесях позволяет повысить топливную экономичность и уменьшить выбросы ЗВ с ОГ. Однако при работе на очень бедных смесях затрудняются условия воспламенения смеси от искры. Применение рециркуляции ОГ ещё больше затрудняет воспламенение рабочей смеси. Поэтому для обеспечения надежной устойчивой работы ДВС необходим мощный начальный очаг горения, от которого пламя быстро и беспрепятственно распространяется по всему объёму камеры сгорания.

Электрическая искра в ДВСПВ, создавая температуру около 10000°C , вызывает появление в ограниченном объёме рабочей смеси первых активных центров, от которых начинается развитие цепной химической реакции окисления топлива.

Искровой разряд, образующийся между электродами свечи зажигания, должен обладать необходимой энергией (0,25...1,4 мДж в обычных «классических» системах зажигания), обеспечивающей надёжное воспламенение рабочей смеси на всех режимах работы двигателя. От мощности искры и момента зажигания рабочей смеси в

значительной степени зависит экономичность и устойчивость работы двигателя, а также токсичность ОГ.

По мере повышения энергии искры концентрационные границы зажигания расширяются. Энергию искры, при которой дальнейший её рост не расширяет концентрационные границы зажигания, называют насыщающей. Для каждого состава смеси существует определенная энергия искры, при которой смесь воспламеняется. Эту энергию принято называть минимальной энергией искрового зажигания для данного состава смеси. В табл. 9 представлены данные по минимальной при стехиометрическом составе смеси энергии искрового зажигания некоторых топливо-воздушных смесей [52].

Таблица 9

Минимальная энергия зажигания некоторых топливо-воздушных смесей (при стехиометрическом составе смеси)

Топливо	Содержание топлива в смеси, % об.	Минимальная энергия зажигания, мДж
Метан	9,50	0,48
Этан	5,68	0,28
Пропан	4,04	0,39
Бутан	3,14	0,38
Пентан	2,56	0,49
Гептан	1,87	0,70
Этилен	6,56	0,096
Циклопропан	4,45	0,35
Циклогексан	2,28	1,00
Бензол	2,73	0,55
Диэтиловый спирт	3,40	0,52
Водород	29,5	0,019

Свеча зажигания является своеобразным электрическим разрядником. Напряжение, при котором происходит пробой искрового промежутка свечи, называется **пробивным**. Источником высокого напряжения служит катушка зажигания. Потребляя ток низкого напряжения аккумуляторной батареи (12 В), она преобразует его в ток высокого напряжения (12...30 кВ).

Величина пробивного напряжения для однородных

электромагнитных полей прямо пропорциональна давлению рабочей смеси P и расстоянию между электродами δ и обратно пропорциональна температуре смеси T (рис. 18):

$$U_{\text{пр}} = f \cdot \frac{P \cdot \delta}{T}, \quad (6)$$

где f – коэффициент пропорциональности, зависящий от состава рабочей смеси, длительности и формы приложенного напряжения, полярности пробивного напряжения, материала электродов и режима работы двигателя.

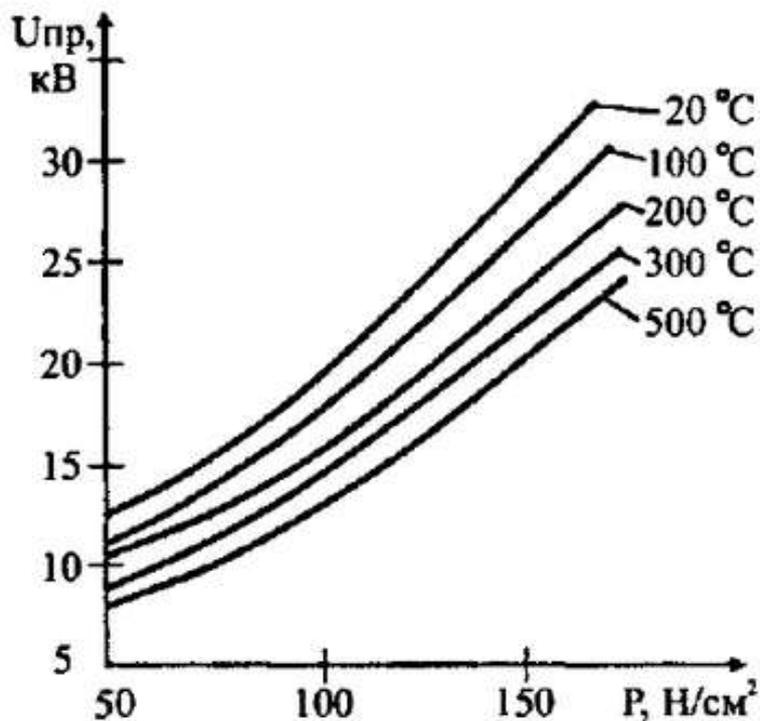


Рис. 18. Зависимость пробивного напряжения от температуры и давления рабочей смеси. Источник: [53]

Так, например, при пуске холодного двигателя стенки цилиндра и электроды свечи холодные, всасываемая топливно-воздушная смесь имеет низкую температуру и плохо перемешана. При сжатии смесь слабо нагревается, и капли топлива не успевают испариться. Попадая в межэлектродное пространство свечи, такая смесь увеличивает пробивное напряжение на 15...20%.

В течение первых 2 тыс. км пробега нового автомобиля пробивное напряжение повышается на 20...25% за счёт округления кромок

электродов свечи. В дальнейшем напряжение растёт за счёт износа электродов и увеличения зазора, что требует проверки и регулировки зазора в свечах через каждые 10...15 тыс. км пробега.

Если двигатель работает на неустановившихся режимах, в результате неоднородности рабочей смеси, поступающей в цилиндры, пробивное напряжение в отдельных цилиндрах может значительно отличаться, а в некоторых случаях могут наблюдаться даже перебои искрообразования, приводящие к резкому росту выбросов СН.

Для современных систем зажигания коэффициент запаса по пробивному напряжению принимают не менее 1,5, а в экранированных системах - не менее 1,8.

Параметры искрового разряда – энергия, длительность, зазор между электродами свечи зажигания – влияют на развитие начала процесса сгорания в цилиндрах двигателя. Проведенными исследованиями установлено, что увеличение энергии и продолжительности индуктивной составляющей искрового разряда обеспечивает большую надёжность воспламенения смеси и снижение расхода топлива на этих режимах [53].

На рис. 19 представлена структурная схема **батарейной системы зажигания** и её основные элементы:

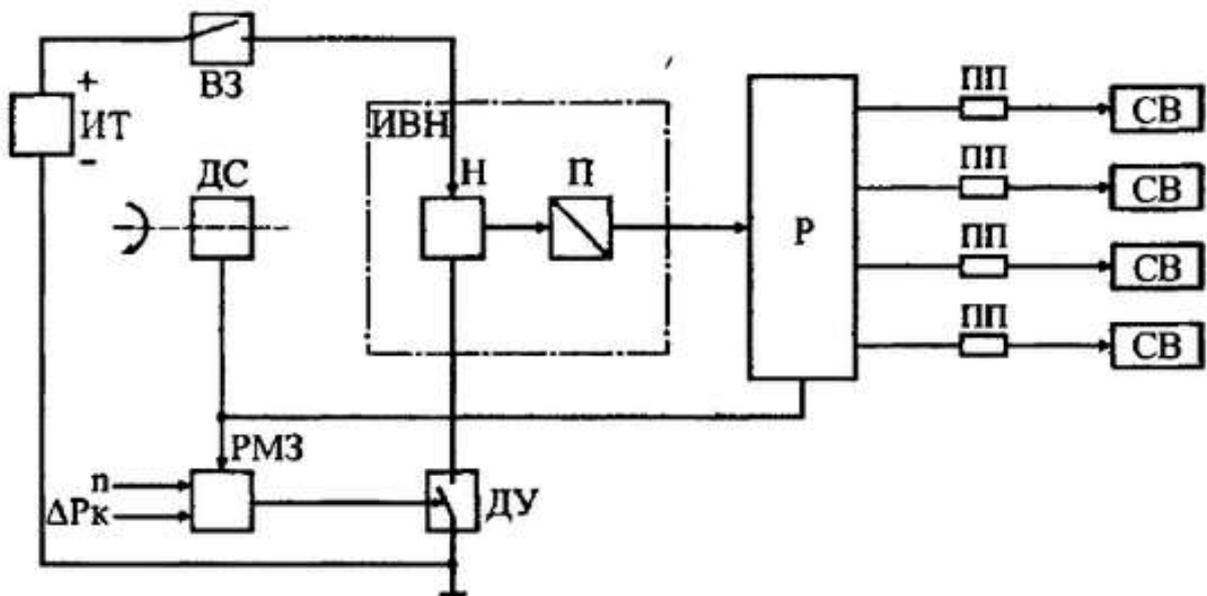


Рис. 19. Структурная схема автомобильной батарейной системы зажигания.

Источник: [53]

- источник тока ИТ, функцию которого выполняет аккумуляторная батарея или генератор;
- выключатель цепи питания ВЗ, функцию которого выполняет замок зажигания;
- датчик-синхронизатор ДС, механическим способом связанный с коленчатым валом двигателя, определяет угловое положение коленчатого вала;
- регулятор момента зажигания РМЗ, который механическим или электрическим способом вычисляет момент подачи искры в зависимости от частоты вращения и нагрузки двигателя;
- источник высокого напряжения ИВН, содержащий накопитель энергии Н и преобразователь низкого напряжения в высокое П, функцию которых выполняет катушка зажигания;
- датчик-управления ДУ, представляющий собой электромеханический ключ (контакты прерывателя) или электронный ключ (мощный транзистор или тиристор), управляемый РМЗ, служит для подключения и отключения ИТ к накопителю ИВН, т.е. управляет процессами накопления и преобразования энергии;
- распределитель импульсов высокого напряжения Р механическим либо электрическим способом распределяет высокое напряжение по соответствующим цилиндрам двигателя;
- элементы помехоподавления ПП, функции которых выполняют экранированные провода и помехоподавительные резисторы, размещенные либо в распределителе Р, либо в свечных наконечниках, либо в высоковольтных проводах в виде распределенного сопротивления;
- свечи зажигания СВ, которые служат для образования искрового разряда и зажигания рабочей смеси в камере сгорания двигателя.

Существующие системы зажигания получают необходимую энергию не непосредственно от аккумуляторной батареи, а от промежуточного накопителя энергии.

Все системы зажигания разделяются на две группы, отличающиеся способами накопления энергии (в индуктивности или ёмкости) и способами размыкания первичной цепи катушки зажигания (типом силового реле).

В тиристорных или ёмкостных системах зажигания (англ. *Capacitive Discharge Ignition, CDI*) энергия для искрового разряда накапливается в конденсаторе, а в качестве силового реле применяется тиристор¹. В этих системах катушка зажигания не накапливает энергию, а лишь преобразует напряжение. Характерной особенностью тиристорных систем зажигания является высокая скорость нарастания вторичного напряжения (1...3 мкс против 30...60 мкс в транзисторных системах), поэтому пробой искрового промежутка свечи надёжно обеспечивается даже при загрязнённом и покрытом нагаром изоляторе свечи. Кроме того, в тиристорных системах величина вторичного напряжения может быть практически постоянной при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя, т.к. конденсатор успевает полностью зарядиться на всех режимах работы двигателя. Мощность разряда легко увеличить простым увеличением ёмкости коммутирующего конденсатора. Однако тиристорные системы зажигания имеют сравнительно малую продолжительность индуктивной составляющей искрового разряда (не более 300 мкс), что приводит к ухудшению воспламеняемости и сгорания рабочей смеси в цилиндрах двигателя на режимах частичных нагрузок. Системы зажигания с накоплением энергии в ёмкости нашли широкое применение в высокооборотных мотоциклетных двигателях, которые не критичны к длительности искрового разряда, а также в двигателях, работающих на природном газе и спиртовом топливе, требующих высоких пробивных напряжений [53].

Многочисленными исследованиями установлено, что на режимах частичных нагрузок и при работе двигателя на сильно обеднённых рабочих смесях требуется продолжительность индуктивной составляющей искрового разряда не менее 1,5...2 мс, что достаточно просто реализуется в системах зажигания с накоплением энергии в

¹ Тиристоры – это очень мощные электронные выключатели (ключи), они способны проводить коммутацию цепей, в которых напряжение может достигать 5000 В, а сила тока – 5000 А (при этом частота не превышает 1000 Гц). Основное применение тиристоров – управление мощной нагрузкой с помощью слабого сигнала, подаваемого на управляющий электрод. В отличие от транзистора тиристор может быть или полностью открыт, или полностью закрыт.

индуктивности (англ. *Ignition Coil Inductor* , *IC*). Последние достижения в области создания **транзисторных систем зажигания**, такие, как использование высоковольтных составных транзисторов Дарлингтона, применение принципа нормирования времени накопления энергии, позволили практически устранить такие недостатки индуктивных систем, как большая зависимость вторичного напряжения от шунтирующего сопротивления на изоляторе свечи и от частоты вращения коленчатого вала. Перечисленные достоинства и простота реализации предопределили широкое использование систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности в автомобильных двигателях.

На энергию искры большое влияние оказывает способ размыкания первичной цепи катушки зажигания. «Классические» батарейные системы зажигания ДВСПВ оснащались контактным прерывателем и поэтому назывались «**контактными**». Применение в «**бесконтактных**» системах зажигания электронного коммутатора, датчика Холла и низкоомной катушки зажигания позволило исключить прерыватель, а вместе с ним и дуговой разряд между его контактами, бесполезно тративший энергию катушки. При этом стал ненужным и конденсатор, который снижал скорость нарастания ЭДС самоиндукции катушки, чтобы дать возможность контактам прерывателя разомкнуться раньше возникновения дугового разряда. В результате значительно подросли напряжение на свече и энергия искрового разряда.

Дальнейшее развитие систем зажигания в направлении повышения энергии искры сопровождалось появлением камер сгорания с двумя свечами зажигания, специальными свечами высокой энергии¹, распределённых катушек зажигания (по одной на каждую свечу с целью исключить высоковольтные провода и связанные с ними потери энергии), а также с появлением плазменного² зажигания.

Горячий ионизированный газ – плазма – может воспламенить

¹ Используя свечу высокой энергии с продленной до 5 мс длительностью искры, можно на 10...15% увеличить коэффициент избытка воздуха и удвоить величину рециркуляции ОГ. Однако выбросы СН и СО при этом не уменьшаются.

² В данном случае этот термин несколько условен, так как любая искра представляет собой объём, занятый низкотемпературной плазмой.

рабочую смесь в ДВС более эффективно, чем электрическая искра. В состав плазмы входят свободные электроны и ионы, которые благодаря высокой температуре (до 40000°C) обладают большой энергией и химической активностью. Плазма создает много активных очагов горения, которые вызывают разветвленную цепную реакцию, способную поддерживать и расширять пламя. Это особенно важно для воспламенения бедных смесей, в которых скорость распространения фронта пламени сравнительно мала.

Плазменная система зажигания отличается от стандартной встроенным высокочастотным (12 кГц) прерывателем постоянного тока с напряжением 12 В. Индукционная катушка повышает напряжение до 3000 В, которое далее выпрямляется. В момент разряда между электродами свечи возникает обычная искра, сопротивление искрового промежутка резко уменьшается и постоянное напряжение 3 кВ образует электрическую дугу, действующую в течение $30...40^{\circ}$ угла поворота коленчатого вала двигателя. Для поддержания дуги достаточно напряжения 900 В. При этом на сжигание рабочей смеси затрачивается до $80...120$ мДж энергии, что значительно больше, чем при обычном электрическом искровом разряде. В камере сгорания образуется большая поверхность воспламенения, фронт подожженной смеси сильно возрастает [54, 55]. Плазменное зажигание позволяет надёжно воспламенять сильно обеднённую и разбавленную отработавшими газами рабочую смесь.

Управление углом опережения зажигания в ДВСПВ

Существенное влияние на мощность, экономичность и токсичность ДВСПВ оказывает момент зажигания. Этот момент определяют углом опережения зажигания, т.е. углом, на который повернётся коленчатый вал ДВС от момента появления искрового разряда в свече до прихода поршня в положение верхней мёртвой точки (ВМТ).

Угол опережения зажигания (обычно обозначается θ), при котором двигатель развивает максимальную мощность на данном режиме работы, называют оптимальным (рис. 20).

Максимум мощности двигатель развивает в том случае, если

наибольшее давление в цилиндре создается через 10...15° ПКВ¹ после ВМТ, т.е. когда процесс сгорания заканчивается несколько позднее ВМТ. Оптимальный угол опережения зажигания определяется временем, которое отводится на сгорание смеси, и скоростью сгорания смеси. В свою очередь, время, отводимое на сгорание, зависит от частоты вращения коленчатого вала, а скорость сгорания определяется составом рабочей смеси и степенью сжатия.

При раннем зажигании (угол опережения больше оптимального) максимальное давление в цилиндре возрастает и «сдвигается» ближе к ВМТ. Это приводит к потере мощности и к риску возникновения детонации с характерными металлическими стуками и форсированным износом деталей двигателя.

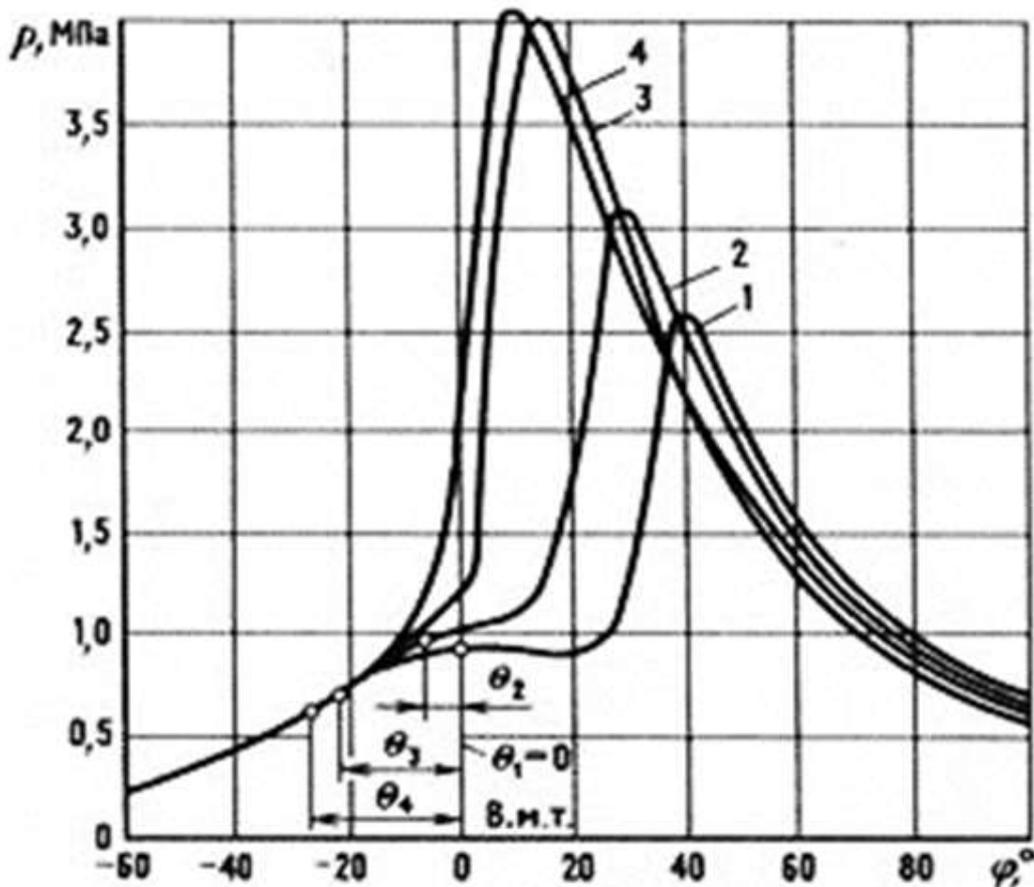


Рис. 20. Фрагменты индикаторных диаграмм ДВС при различных углах опережения зажигания θ . 1 – $\theta_1=0$; 2 – $\theta_2=7^\circ$; 3 – $\theta_3=22^\circ$; 4 – $\theta_4=27^\circ$ [56]

¹ Градусов поворота коленчатого вала ДВС.

Нормальный процесс сгорания протекает со скоростью 20...50 м/с. В процессе детонации скорость сгорания достигает 2...3 тыс. м/с.

Причиной детонации является образование **перекисей**. Кислород при высокой температуре внедряется в углеводородную молекулу топлива, повышая её способность к самовоспламенению. Детонационному (взрывному) сгоранию подвергается та часть рабочей смеси, которая должна была сгореть в последнюю очередь. Перекиси накапливаются в несгоревшей части рабочей смеси и при достижении критической концентрации распадаются со взрывом и выделением большого количества тепла, активизируя всю рабочую смесь.

Признак детонации – чёрный дым. Его причиной является заброс несгоревшего топлива в зону горения, где нет кислорода. При детонации ударная волна отражается от стенок цилиндра с частотой 2000...3000 Гц, при этом возникают металлические стуки. Давление и температура в цилиндре резко возрастает, а мощность падает.

Для устранения детонации уменьшают угол опережения зажигания. В современных автомобилях это выполняется автоматически. В блоке цилиндров установлен датчик детонации. При появлении детонации сигнал с датчика передаётся на бортовой компьютер, который при помощи исполнительного механизма автоматически уменьшает угол опережения зажигания, снижая давление и температуру в камере сгорания и предотвращая детонацию. Регулирование угла опережения зажигания производится отдельно для каждого цилиндра.

На детонационное сгорание рабочей смеси кроме угла опережения зажигания влияют:

- степень сжатия (повышение степени сжатия ускоряет детонацию),
- качество топлива (октановое число меньше, детонация больше),
- состав рабочей смеси (богатая смесь более склонна к детонации) и другие факторы.

При позднем зажигании (угол опережения зажигания меньше оптимального) большая часть рабочей смеси горит после прохождения поршнем ВМТ, на такте расширения. Давление газов не достигает своей максимальной величины, мощность и экономичность двигателя снижаются. Однако при этом снижается и максимальная температура в камере сгорания, что приводит к снижению образования NO.

При работе двигателя на обедненных смесях ($\alpha > 1$) с уменьшением угла опережения зажигания резко снижается концентрация NO в ОГ. Это связано с понижением максимальной температуры цикла, которая в данном случае ограничивает выход окислов азота. Уменьшение угла опережения зажигания на 10% относительно оптимального приводит к снижению образования NO на 50% [13].

При работе двигателя на обогащенных смесях с $\alpha = 0,8 \dots 0,95$ выход окислов азота ограничивается недостатком свободного кислорода в продуктах сгорания. Поэтому изменение θ практически не влияет на концентрацию NO в отработавших газах.

Изменение угла опережения зажигания на концентрацию CO и CO₂ в отработавших газах практически не влияет.

Выбросы углеводородов при небольшом уменьшении угла опережения зажигания уменьшаются. Это объясняется тем, что температура ОГ, выходящих из цилиндра, увеличивается, что приводит к более интенсивному окислению углеводородов в выпускной системе. Однако при чрезмерно позднем зажигании наблюдается увеличение выбросов СН, т.к. сокращение времени, отводимого на сгорание смеси, приводит к её неполному сгоранию.

Управление углом опережения впрыска топлива в ДВСВС

Рабочий процесс ДВСВС сильно зависит от того, как топливо впрыскивается в камеру сгорания. Самыми важными факторами, определяющими мощность и КПД двигателя, а также образование ЗВ являются:

- момент начала впрыскивания топлива;
- продолжительность впрыскивания и цикловая подача топлива;
- дисперсность распыливания и распределение топлива в камере сгорания, что в свою очередь определяется давлением впрыскивания, количеством и направлением струй впрыскивания.

Обобщенные данные по влиянию **угла опережения впрыска топлива** на изменение токсичности и эффективных показателей ДВСВС приведены на рис. 21.

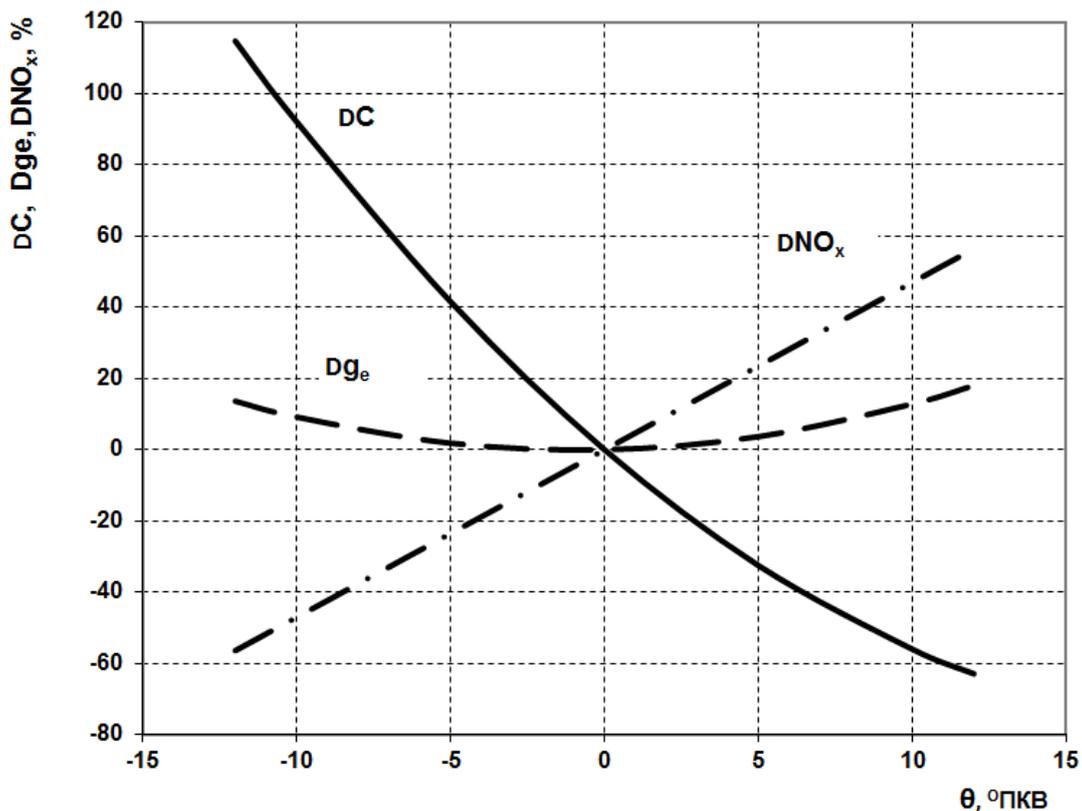


Рис. 21. Влияние изменения угла опережения впрыска топлива на экономичность, дымность и концентрацию NO_x в ОГ ДВСВС. Источник: [57]

Зависимости удельных (г/кВтч) показателей расхода топлива и выбросов ЗВ с ОГ от момента начала впрыска и продолжительности впрыска для 6-цилиндрового ДВСВС грузового автомобиля с системой впрыска Common Rail на режиме $n=1400$ об/мин и 50% нагрузке показаны на рис. 22. Изменение продолжительности впрыскивания в данном случае производилось путём изменения давления впрыска топлива.

Как видно из представленных зависимостей, угол опережения впрыска топлива существенным образом влияет на изменение концентрации в ОГ как оксидов азота, так и сажи, причём это влияние взаимнообратное. Таким образом, выбирая стратегию по управлению величиной угла опережения впрыска топлива в ДВСВС, необходимо принимать компромиссное решение, учитывающее не только относительную опасность этих двух ЗВ, но и возможные пути дальнейшей борьбы с ними методами очистки ОГ, о которых речь пойдёт в соответствующей главе данного учебного пособия.

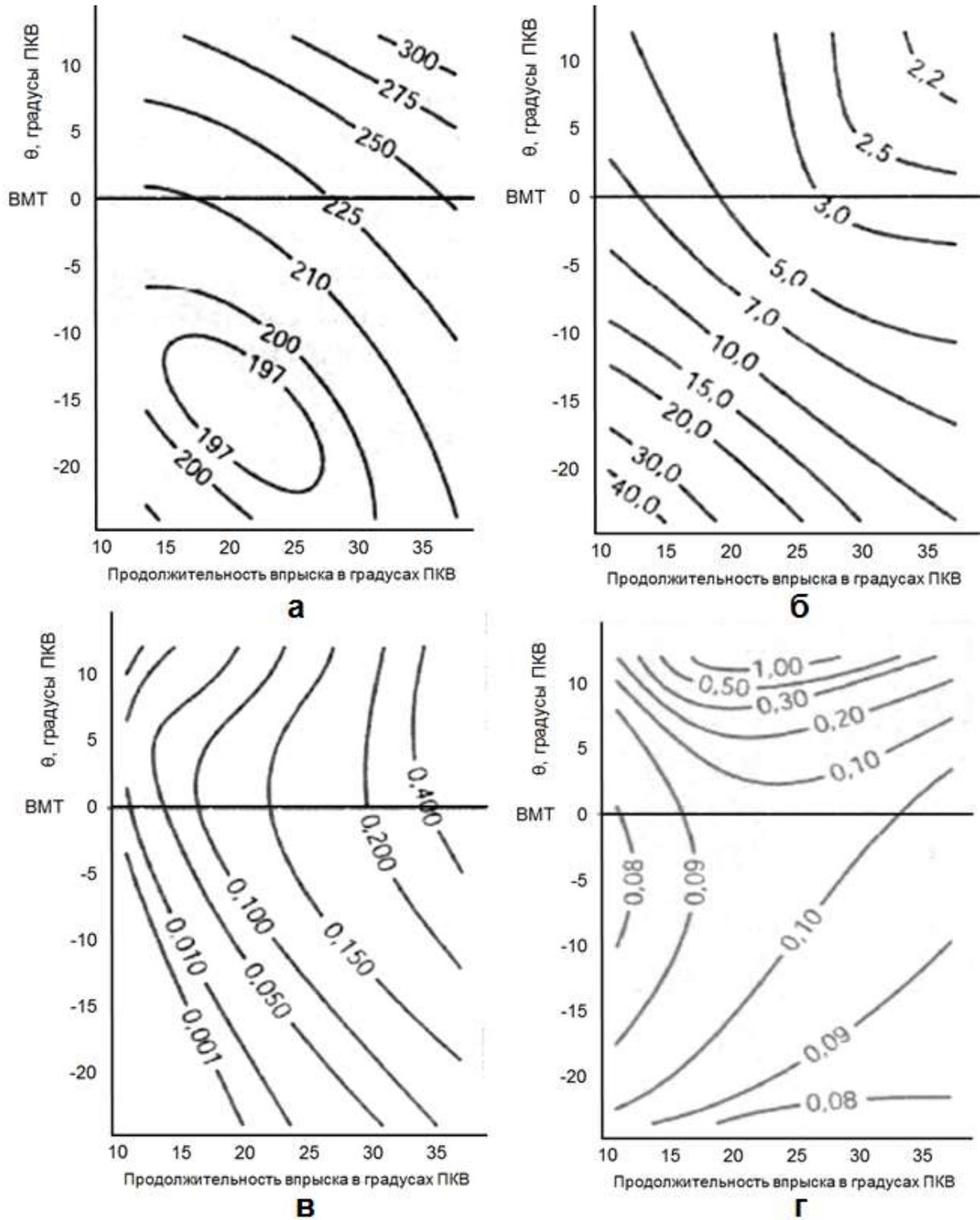


Рис. 22. Зависимости удельных ($г/кВтч$) показателей расхода топлива (а), выбросов NO_x (б), сажи (в) и CH (г) от момента начала впрыска θ и продолжительности впрыска [102]

Управление изменением фаз газораспределения

Задача механизма газораспределения – обеспечить наполнение цилиндров свежей смесью и очистку цилиндров от ОГ во время работы двигателя.

Фазы газораспределения – это периоды от момента открытия клапанов до момента их закрытия, выраженные в градусах поворота коленчатого вала и отмечаемые по отношению к начальным или конечным моментам соответствующих тактов (рис. 23).

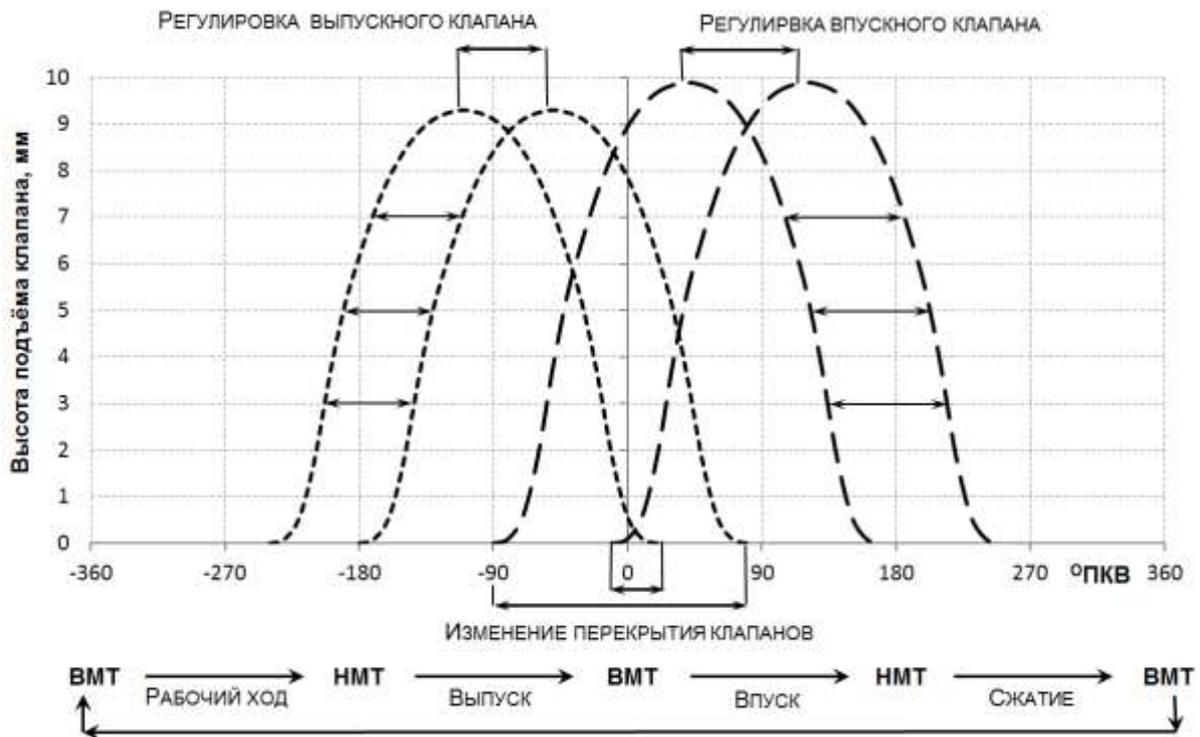


Рис. 23. Изменение фаз газораспределения за счёт регулировки впускных и выпускных клапанов. Адаптировано из [58]

В конце такта выпуска и начале такта впуска одновременно открыты и выпускные и впускные клапаны, такая ситуация называется перекрытием клапанов.

Угол перекрытия клапанов выбирают обычно из условий обеспечения максимального коэффициента наполнения цилиндра на режиме номинальной мощности. **Коэффициентом наполнения** называется отношение количества воздуха, фактически попавшего в цилиндр, к определённому рабочим объёмом теоретическому количеству при стандартных условиях (атмосферное давление $p_0=105$ Па,

температура $T_0=273,15$ К). В двигателях без наддува он невелик ($20...70^\circ$ угла поворота коленчатого вала). В период перекрытия клапанов уходящие с большой скоростью через выпускную систему ОГ создают в камере сгорания разрежение, способствующее поступлению в неё свежей смеси. Происходит так называемый «динамический наддув», в результате которого коэффициент наполнения достигает максимальных величин.

Однако на режимах малых нагрузок в период перекрытия клапанов скорость уходящих ОГ невелика, и разрежение в камере сгорания оказывается меньше, чем в выпускном коллекторе. В результате этого продукты сгорания засасываются обратно в цилиндр и даже забрасываются во впускной трубопровод. Это приводит к разбавлению свежей рабочей смеси продуктами сгорания. На режимах холостого хода и торможения, когда дроссельная заслонка прикрыта почти полностью, разрежение во впускном трубопроводе и в цилиндре двигателя увеличивается, что приводит к увеличению количества продуктов сгорания, попадающих в цилиндр, и к ухудшению процесса сгорания. Особенно опасно такое явление при работе двигателя на обедненной смеси.

По указанным выше причинам на режимах холостого хода и малых нагрузок необходимо уменьшать угол перекрытия клапанов. С уменьшением перекрытия клапанов резко падает содержание СН, особенно при работе двигателя на богатых смесях [59].

Концентрация СО не зависит от угла перекрытия клапанов и определяется только величиной α . Поэтому уменьшение угла перекрытия клапанов, которое позволяет работать на холостом ходу на обедненной смеси при практически неизменной концентрации СН, приводит к резкому снижению концентрации СО. Такого же эффекта от уменьшения угла перекрытия клапанов следует ожидать и на режиме принудительного холостого хода.

Однако необходимо помнить, что уменьшение угла перекрытия клапанов приводит к понижению коэффициента наполнения при большой частоте вращения коленчатого вала. На режимах полностью открытой дроссельной заслонки, особенно при обеднённых смесях, суммарная токсичность в основном определяется содержанием окислов азота. Для

их уменьшения как один из методов применяют разбавление заряда отработавшими газами. Вместо перепуска части ОГ во впускную систему (см. рециркуляция отработавших газов) можно для указанных режимов разбавить заряд в цилиндре продуктами сгорания, увеличив угол перекрытия клапанов. Таким образом, целесообразно иметь регулируемые фазы газораспределения.

В обычном двигателе коленчатый и распределительный валы связаны друг с другом механически (посредством зубчатого ремня, шестерен или цепи). В двигателях с регулированием фаз газораспределения с помощью поворота распределительного вала (по меньшей мере, распределительного вала привода впускных клапанов, хотя всё чаще и выпускных) распределительный вал может поворачиваться относительно коленчатого вала, благодаря чему можно изменить фазы газораспределения. Поворот распределительного вала осуществляется посредством электрического или электрогидравлического привода. Простые устройства могут повернуть этот вал только в одно из двух положений. Более сложные устройства позволяют в пределах определенного диапазона плавно поворачивать распределительный вал относительно коленчатого.

Но на период открытого положения и высоту подъёма клапанов рассмотренное поворачивание распределительного вала не влияет. С тем чтобы задействовать и эти возможности для более полного контроля над рабочим процессом ДВС, применяются системы с изменяемой высотой (и скоростью) подъёма впускных клапанов. Такой подход позволяет частично переложить функции дроссельной заслонки на газораспределительный механизм. В таких системах высота подъёма и продолжительность фазы впуска изменяются в зависимости от нажатия на педаль газа. Регулирование газораспределения, при котором можно изменять как высоту подъёма впускных клапанов, так и фазы газораспределения, называется полновариантным.

Небольшая высота подъёма впускных клапанов с одновременным небольшим открытием дроссельной заслонки обеспечивают повышенную скорость всасывания смеси и, тем самым, лучшую степень турбулентности потока свежего воздуха (при непосредственном впрыске топлива в камеру сгорания) либо рабочей смеси (при впрыске топлива во

впускной трубопровод). Таким образом, обеспечивается очень хорошее перемешивание рабочей смеси на режиме частичной нагрузки, и следовательно, её более полное сгорание.

Максимальную гибкость регулирования фаз газораспределения и наибольшую возможность снижения расхода топлива предоставляют системы с регулированием фаз газораспределения без участия распределительного вала. При таком регулировании открытие/закрытие клапанов осуществляют, например, электромагнитные исполнительные механизмы, управляемые дополнительным блоком управления.

Экономия топлива от применения системы «бездрессельного» управления составляет от 8% до 15%, что связано с уменьшением насосных потерь и улучшением смесеобразования, а прирост мощности изменяется в пределах от 5 до 15%, что связано с улучшением коэффициента наполнения цилиндра свежей смесью [58].

Управление геометрией впускного тракта

На процессы газообмена в ДВС влияют не только фазы газораспределения, но и конструкция впускного и выпускного трактов.

Движение поршня на такте впуска приводит к образованию волны разрежения-сжатия, распространяющейся по впускному трубопроводу. На открытом раструбе впускного трубопровода эта волна встречается с массой неподвижного окружающего воздуха, отражается от неё и движется обратно к впускному клапану. Возникающие вследствие этого колебания давления у впускного клапана можно использовать для увеличения наполнения цилиндров зарядом свежей смеси и, тем самым, получения большей мощности. Такой эффект «динамического наддува» основан на использовании динамических свойств воздуха на впуске. Динамические эффекты во впускном трубопроводе зависят от геометрических форм этого трубопровода, параметров воздуха, а также от частоты вращения коленчатого вала ДВС.

Длина и диаметр отдельных элементов впускного трубопровода (резонаторных трубок и резонансных камер) согласуются с фазами газораспределения таким образом, чтобы в требуемом диапазоне частоты вращения коленчатого вала волна сжатия, отражающаяся на конце резонаторной трубки, вернулась через открытый впускной клапан в

цилиндр, тем самым обеспечивая лучшее наполнение цилиндра. Длинные тонкие резонаторные трубки дают большой эффект динамического наддува при низкой частоте вращения коленчатого вала. Короткие широкие резонаторные трубки способствуют получению лучшей характеристики крутящего момента в диапазоне высоких оборотов коленчатого вала [58].

При использовании впускного трубопровода с изменяемой геометрией, в зависимости от режима работы двигателя, при помощи специальных заслонок производят:

- изменение длины и/или диаметра резонаторных трубок;
- изменение объёмов резонансных камер.

Это позволяет увеличить наполнение цилиндра свежей смесью и тем самым повысить энергоотдачу двигателя в широком диапазоне частот вращения.

Существенную роль в формировании гомогенной рабочей смеси играют условия поступления воздуха во впускной трубопровод и цилиндры. Быстрое движение заряда обеспечивает хорошее перемешивание рабочей смеси и, соответственно, полное сгорание с низкой концентрацией ЗВ в ОГ. Существует несколько различных возможностей для улучшения гомогенизации рабочей смеси:

- управление подъёмом впускных клапанов (см. раздел «Управление изменением фаз газораспределения»);
- применение заслонки управления движением заряда в двухклапанных газораспределительных механизмах. В данном случае впускной трубопровод вблизи клапана разделяется перегородкой на два параллельных канала. Один из каналов на режимах малых и средних нагрузок может перекрываться заслонкой, заставляющей рабочую смесь двигаться по оставшемуся открытым каналу с большей скоростью. На режимах больших нагрузок клапан открывается, обеспечивая максимальное наполнение цилиндра рабочей смесью;
- применение заслонки управления движением заряда в четырёхклапанных газораспределительных механизмах. В этом случае заслонка перекрывает один из каналов, ведущих к двум впускным клапанам. Отличие от предыдущего варианта заключается в том, что при перекрытии одного из впускных каналов не только увеличивается

скорость движения заряда, но и создаётся тангенциальный вихрь, улучшающий перемешивание смеси.

В ДВСПВ с непосредственным впрыском дополнительно используется ещё один способ. На режимах частичных и малых нагрузок в таких двигателях необходимо создавать глубоко расслоённую рабочую смесь, когда в области камеры сгорания, прилегающей к свече зажигания, создаётся обогащённая смесь, а на периферии камеры сгорания – сверхбедная смесь. Для этого перекрытием одного из впускных каналов создают интенсивный тангенциальный вихрь, а впрыск топлива осуществляют в середине такта впуска. Сконцентрированное «облако» обогащённой смеси специальным выступом на днище поршня направляется к свече зажигания. На режимах полных нагрузок необходимо обеспечивать максимальное наполнение всей камеры сгорания гомогенной смесью. Для этого открывают оба впускных канала, а впрыск топлива осуществляют в самом начале такта впуска.

Организация «послойного» смесеобразования

Для уменьшения выделения всех основных токсичных компонентов (NO_x , CO , CH) целесообразно применять глубокое расслоение рабочей смеси в камере сгорания ДВСПВ, при котором в первой стадии процесс сгорания протекает в зоне обогащенной смеси, а во второй стадии — в зоне сверхбедной смеси. Образование NO_x в первой стадии ограничивается недостатком кислорода, а во второй — низкой температурой. Снижение продуктов неполного сгорания обеспечивается высоким значением среднего по камере сгорания коэффициента избытка воздуха α . Однако у двигателя с расслоением смеси следует ожидать повышенного выделения альдегидов, так как в последней стадии процесс сгорания происходит при невысокой температуре.

При послойном смесеобразовании обогащённая смесь находится в зоне свечи зажигания; это создает благоприятные условия для воспламенения смеси электрической искрой и формирования начального очага пламени, что обеспечивает устойчивую работу двигателя на обеднённых смесях и уменьшение цикловой неравномерности.

В настоящее время известно много способов послойного смесеобразования и сжигания неравномерно распределенной смеси.

Они могут быть разделены на две основные группы:

- расслоение в неразделенной камере сгорания;
- расслоение при применении разделённых камер сгорания.

Расслоение смеси внутри неразделённой камеры сгорания ДВСПВ может быть достигнуто подачей в неё расслоённой смеси, с помощью создания вихревого движения заряда или при организации непосредственного впрыска бензина в камеру сгорания (см. раздел «Управление геометрией впускного тракта»).

Расслоение смеси в конструкциях ДВСПВ с форкамерой обеспечивается следующим образом. Камеру сгорания делают разделённой на 2 части: один объём – форкамера (полость в головке блока цилиндров), второй – основная камера сгорания (объём между поршнем и головкой блока). В форкамеру подаётся обогащённая смесь, а в основную камеру сгорания – переобеднённая. Свеча зажигания устанавливается в форкамере, что обеспечивает надёжное воспламенение обогащённой смеси, подаваемой в этот объём. Горящая смесь, вырываясь факелом из связывающего обе камеры канала, поджигает основной объём бедной смеси. Данные системы не получили широкого распространения из-за низкой эффективности, которая связана как с большими гидравлическими потерями на «перетекание» смеси из форкамеры в основную камеру сгорания, так и с большими тепловыми потерями, вызванными большой поверхностью обеих частей камеры сгорания.

Однако в ДВСВС для легковых автомобилей конструкции с разделённой камерой сгорания (вихрекамерные или предкамерные дизели) получили в своё время широкое распространение. Несмотря на худшую топливную экономичность, такие конструкции обладали определёнными преимуществами:

- меньшим уровнем вибрации и шума;
- меньшим уровнем концентраций сажи и NO_x .

Однако в последнее время решить проблемы шума, вибрации и выбросов сажи и оксидов азота оказалось возможным благодаря появлению системы Common Rail, где характеристика впрыска топлива задаётся электронной системой управления двигателем, а также благодаря применению систем очистки ОГ. Поэтому последние модели

ДВСВС для легковых автомобилей имеют, как правило, неразделённую камеру сгорания.

Управление степенью сжатия

В зависимости от конструкции двигателя и типа смесеобразования **степень сжатия** (обычно обозначается ϵ) ДВСВС для легковых и грузовых автомобилей составляет $\epsilon=16...24$. Эта величина у ДВСПВ значительно ниже ($\epsilon=7...13$).

Высокая степень сжатия в ДВСВС необходима для создания условий самовоспламенения впрыскиваемого в камеру сгорания дизельного топлива. Температура воспламенения для легковоспламеняющихся компонентов дизельного топлива составляет около 250°C . Воздух в дизелях сжимается до $3...5$ МПа в двигателях без наддува и до $7...15$ МПа в двигателях с наддувом. Температура при этом достигает $700...900^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает надёжное самовоспламенение дизельного топлива.

В ДВСПВ величина степени сжатия ограничивается из соображений предотвращения детонации. Из-за ограниченных антидетонационных свойств бензина рабочая смесь при высоком давлении сжатия в камере сгорания ДВСПВ и возникающей при этом высокой температуре самовоспламенялась бы неконтролируемым образом, т.е. возникала бы **детонация**. В случае использования в ДВСПВ топлив с лучшими антидетонационными свойствами (метана, пропана, спиртов и т.п.) степень сжатия увеличивают¹ для улучшения мощностных и экономических показателей.

В обычных ДВС степень сжатия – величина постоянная, задаваемая размерностью кривошипно-шатунного механизма. Однако периодически появляются экспериментальные конструкции ДВСПВ с изменяемой степенью сжатия. Идея регулирования степени сжатия заключается в следующем. Поскольку детонация возникает на режимах больших нагрузок, то на этих режимах необходимо уменьшать степень сжатия до значений, гарантирующих отсутствие детонации ($\epsilon=7...10$). С другой стороны, режимы средних и особенно малых нагрузок свободны от

¹ При условии монотопливного исполнения ДВС.

детонации, но характеризуются низкой эффективностью рабочего процесса. Поэтому на этих режимах необходимо увеличивать степень сжатия ($\varepsilon=13\dots17$) для повышения эффективности ДВС.

При увеличении степени сжатия концентрация несгоревших углеводородов возрастает. Это главным образом объясняется тем, что с увеличением ε возрастает относительная поверхность камеры сгорания $F_{КС}/V_{КС}$ [60], что увеличивает объём зоны гашения и количество несгоревших углеводородов.

Изменение ε не оказывает существенного воздействия на концентрацию CO.

Изменение ε существенно влияет на концентрацию NO_x при работе на бедных смесях (увеличение ε увеличивает концентрации NO_x); при работе на богатых смесях влияние степени сжатия значительно уменьшается.

В результате можно сделать вывод, что при повышении степени сжатия ДВСПВ токсичность отработавших газов несколько возрастает из-за повышения концентраций оксидов азота (при регулировках на обеднённую смесь) и несгоревших углеводородов.

Степень сжатия в ДВСВС влияет главным образом на выделение окислов азота. Характер влияния тот же, что и в ДВСПВ.

Цикл Аткинсона (Миллера)

Большинство современных бензиновых двигателей работает по циклу Отто¹. Несколько усовершенствованный цикл носит название цикла Аткинсона. В 1886 году Аткинсон предложил изменить соотношение времён тактов цикла Отто. В двигателе Аткинсона рабочий ход (3-й такт цикла Отто) был увеличен за счёт усложнения кривошипно-шатунного механизма. В XIX веке двигатель распространения не получил из-за сложной механики.

Цикл Миллера был предложен в 1947 году американским инженером Ральфом Миллером как способ совмещения достоинств

¹ От фамилии изобретателя Николауса Августа Отто, впервые представившего 4-тактный газовый двигатель с синхронизацией впрыска и сгорания топлива в 1876 г.

двигателя Аткинсона с более простым кривошипно-шатунным механизмом двигателя Отто. Вместо того чтобы сделать такт сжатия механически более коротким, чем такт рабочего хода (как в классическом двигателе Аткинсона, где поршень движется вверх быстрее, чем вниз), Миллер предложил сократить такт сжатия за счёт такта впуска, сохраняя движение поршня вверх и вниз одинаковым по скорости (как в классическом двигателе Отто).

Для этого Миллер предложил два разных подхода: либо закрывать впускной клапан существенно раньше окончания такта впуска (или открывать позже начала этого такта), либо закрывать его существенно позже начала такта сжатия. Первый подход носит условное название «укороченного впуска», а второй — «укороченного сжатия».

В конечном счете оба этих подхода дают одно и то же: снижение фактической степени сжатия рабочей смеси относительно геометрической, при сохранении неизменной степени расширения (то есть такт рабочего хода остается таким же, как в двигателе Отто, а такт сжатия как бы сокращается — как у Аткинсона, только сокращается не по времени, а по степени сжатия смеси) [61].

В двигателе, работающем по циклу Аткинсона/Миллера, происходит определенная задержка закрытия впускного клапана, что приводит к эффективному снижению степени сжатия посредством выпуска части рабочей смеси обратно во впускной коллектор (рис. 24). Это приводит к тому, что степени сжатия и расширения отличаются друг от друга. Более высокая степень расширения означает более полное использование энергии топлива, т.е. растет эффективность. А степень сжатия сохраняется на приемлемом с точки зрения предотвращения детонации уровне. Благодаря тому, что степень расширения оказывается выше, чем степень сжатия, снижается термонагруженность двигателя. Поэтому циклы Миллера и Аткинсона называют циклами с высокой степенью расширения или циклами с внутренним охлаждением.

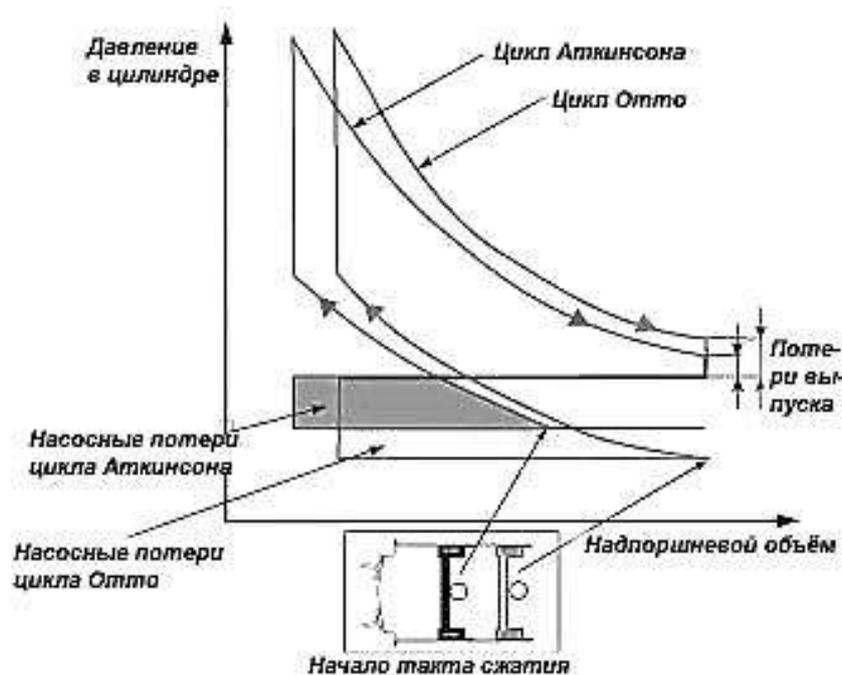


Рис. 24. Сравнение индикаторных диаграмм циклов Отто и Аткинсона/Миллера [61]

Выгода от повышения тепловой эффективности цикла Аткинсона/Миллера относительно цикла Отто сопровождается потерей пиковой выходной мощности для данного размера (и массы) двигателя из-за ухудшения наполнения цилиндра, особенно на малых частотах вращения коленчатого вала. Решением этой проблемы является использование приводного компрессора, например, компрессора Лишольма (Lisholm), для обеспечения наддува.

Управление наддувом

В противоположность атмосферному впуску у двигателей с наддувом воздух подаётся в цилиндры под избыточным давлением. Этим увеличивается масса рабочей смеси в цилиндре¹, что приводит к повышению выходной мощности двигателя при равном рабочем объёме. В моторе с меньшим рабочим объёмом тратится меньше энергии на преодоление сил инерции движущихся деталей (относительно более лёгких), поверхности трения и насосные потери также меньше. В итоге

¹ Коэффициент наполнения может доходить до величины 3,0.

коэффициент полезного действия ДВС с наддувом оказывается выше.

Наддув воздуха осуществляется при помощи так называемых нагнетателей. Привод нагнетателей может быть:

- механическим,
- газодинамическим,
- электрическим.

Нагнетатели (компрессоры) с механическим приводом от коленчатого вала двигателя («механический наддув») могут быть **объёмного** (нагнетатель со скользящими лопатками, поршневой нагнетатель, винтовой нагнетатель и т.п.) или **центробежного** типа.

При непосредственном приводе нагнетателя от коленчатого вала двигателя частота вращения вала нагнетателя напрямую зависит от частоты вращения коленчатого вала. За счёт этого достигаются лучшие динамические характеристики двигателя по сравнению с турбонаддувом.

Но на привод нагнетателя затрачивается часть мощности двигателя, что приводит к дополнительному расходу топлива. Этот недостаток можно уменьшить посредством отключения нагнетателя на режимах малых нагрузок двигателя.

Нагнетатели с приводом от газодинамической турбины («турбонаддув») относятся к центробежному типу. Горячие ОГ действуют на лопатки газовой турбины, придавая ей быстрое вращательное движение (до 250000 об/мин). Лопатки колеса компрессора, соосно вращающегося вместе с колесом турбины, нагнетают воздух во впускной трубопровод под давлением в несколько раз выше атмосферного.

Турбокомпрессор расположен непосредственно в потоке горячих ОГ (для ДВСПВ – около 1000°С, для ДВСВС – порядка 600°С) и поэтому должен изготавливаться из термостойких материалов.

Соппротивление движению ОГ, возникающее перед турбиной, увеличивает работу выталкивания, производимую двигателем на такте выпуска. Несмотря на это, КПД двигателя в диапазоне частичных нагрузок повышается.

К недостаткам двигателя с турбонаддувом следует отнести низкий крутящий момент при очень низких оборотах коленчатого вала. Энергии, содержащейся в ОГ в этом диапазоне частот вращения, для привода турбины не хватает. На неустановившемся режиме разгона двигателя

характеристика крутящего момента хуже и на средних оборотах, чем у двигателя без наддува (эффект «турбоямы»). Причина – инерция формирования потока ОГ.

Нагнетатели с электрическим приводом («электронаддув») используют электроэнергию для вращения центробежного компрессора. Как правило, такой вид наддува применяется на автомобилях с гибридной силовой установкой, где используются более мощные агрегаты электрооборудования, и осуществляется «интеллектуальное» управление энергопотоками. Электропривод может быть автономным, а может комбинироваться с турбонаддувом. В этом случае электромотор помогает ОГ раскрутить турбину на режимах максимальной нагрузки, а также ликвидировать «турбояму».

Во время сжатия воздух в нагнетателе может нагреваться почти до 180°C. Поскольку нагретый воздух обладает меньшей плотностью по сравнению с холодным, подобный разогрев отрицательно сказывается на наполнении цилиндров. Охлаждение сжатого и нагретого воздуха осуществляется в специальном теплообменнике («интеркулере»), что приводит к повышению наполнения цилиндров. Более низкая температура воздуха ведёт и к более низкой температуре заряда смеси в цилиндре. Это даёт следующие преимущества:

- снижение риска возникновения детонации (в ДВСПВ);
- повышение термического КПД и, тем самым, снижение расхода топлива;
- уменьшение термической нагрузки на поршни;
- уменьшение выбросов NO_x с ОГ.

Двигатели должны развивать высокий крутящий момент уже при низкой частоте вращения коленчатого вала, поэтому нагнетатель конструируется из расчета небольшого расхода ОГ. Для того чтобы при больших расходах ОГ нагнетатель не перегружал двигатель и сам не выходил из строя, давление наддува необходимо регулировать. Для этого используются следующие конструктивные варианты:

- нагнетатель с перепуском части ОГ (англ. *waste-gate*);
- нагнетатель с двумя различными каналами подвода ОГ (англ. *twin-scroll*);
- нагнетатель с изменяемой геометрией турбины (англ. *variable*

geometry turbocharger, VGT);

- нагнетатель с дросселированием турбины (англ. *variable nozzle turbocharger, VNT*).

В первом случае регулирование давления наддува осуществляется через перепускной канал. Часть сжатого в нагнетателе воздуха подаётся в цилиндр и определяет его наполнение, а другая часть направляется через перепускной канал обратно на вход нагнетателя.

Второй вариант предусматривает два параллельных, но разного размера и формы канала для ОГ в едином корпусе «улитки» турбины — ОГ в каждый из каналов попадают от своей группы цилиндров, но крутят единое турбинное колесо. Его лопатки выполнены таким образом, что одинаково эффективно воспринимают импульсы из обоих каналов. Из-за различной геометрии каналов достигаются заданные характеристики наддува в широком диапазоне частот вращения двигателя, а отсутствие столкновения и завихрения потоков ОГ от разных групп цилиндров улучшает газодинамические свойства системы.

Турбина с изменяемой геометрией лопаток предоставляет ещё одну возможность ограничения потока ОГ при высоких оборотах коленчатого вала. Такие нагнетатели широко применяются на ДВСВС. На ДВСПВ они ещё довольно редки из-за высоких термических нагрузок, вызванных собственными этим двигателям более горячими ОГ. На малых частотах вращения коленчатого вала соответствующим поворотом направляющих лопаток устанавливается малая площадь поперечного сечения отверстий для прохода ОГ, так чтобы поток ОГ развивал в турбине высокую скорость, разгоняя её до высокой частоты вращения. При высоких частотах вращения коленчатого вала обеспечивается увеличение поперечного сечения отверстий для прохождения ОГ, так чтобы поток ОГ не разгонял газовую турбину до слишком высоких скоростей, тем самым ограничивается давление наддува (рис. 25).

Нагнетатель с дросселированием турбины устанавливают на небольших двигателях легковых автомобилей. Регулировочная заслонка постепенным открытием нескольких подводных каналов изменяет в этой конструкции проходное сечение для подвода ОГ к турбине. Меньшее поперечное сечение приводит к высокой скорости течения ОГ и тем самым к высокой частоте вращения вала газовой турбины. При

достижении желаемого давления наддува регулирующая задвижка плавно открывает дополнительный канал, подводящий ОГ к турбине. Скорость течения ОГ, а вместе с тем частота вращения вала турбины и давление наддува уменьшаются.

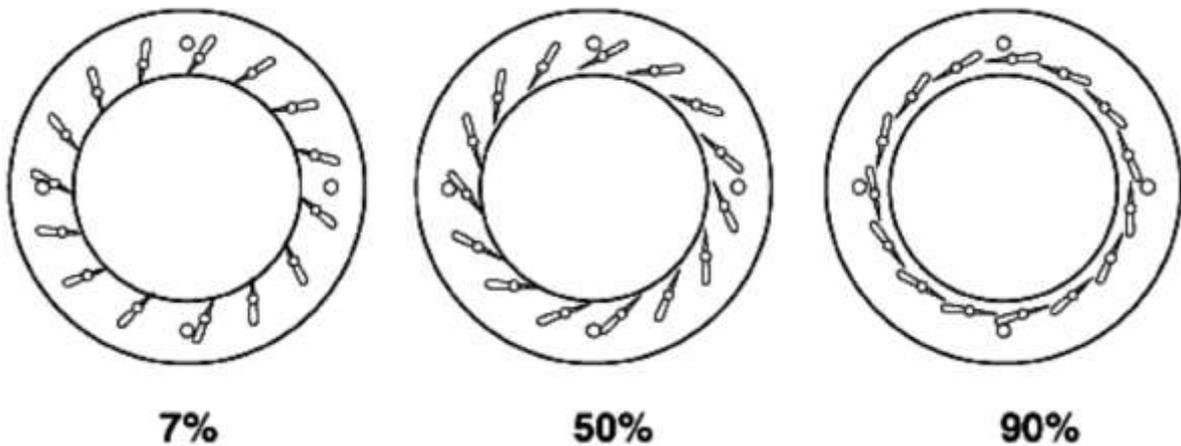


Рис. 25. Положение лопаток турбины VGT-нагнетателя, соответствующее 7%, 50% и 90% давлению наддува. Источник: Detroit Diesel

Многоступенчатый наддув позволяет существенно расширить пределы регулирования мощности ДВС по сравнению с одноступенчатым наддувом. При этом удаётся улучшить как подачу воздуха в цилиндры, так и удельный расход топлива на стационарных и переходных режимах работы двигателя. Имеются конструкции с двух- и даже трёхступенчатым наддувом, в которых используются различные комбинации нагнетателей.

Следует отметить, что при высоких степенях наддува возрастает риск детонации, поэтому необходимо предусматривать ряд мер по предотвращению этого явления, в частности, уменьшать степень сжатия, уменьшать угол опережения зажигания, обеднять рабочую смесь и т.п.

Совершенствование систем впрыска топлива

Для соблюдения жёстких требований к организации рабочего процесса как в ДВСПВ, так и в ДВСВС в настоящее время используются системы впрыска топлива с электронным управлением. Это обеспечивает наиболее полный учёт всех влияющих факторов и наиболее гибкое регулирование.

Совершенствование систем впрыска топлива ДВСПВ

В ДВСПВ система впрыска заменила карбюратор – устройство, устанавливаемое во впускном трубопроводе и предназначенное для приготовления рабочей смеси необходимого состава на всех режимах работы двигателя. Таким образом, рабочая смесь готовилась прежде, чем поступала в камеру сгорания. Это называется «внешним смесеобразованием».

Существующие в настоящее время системы впрыска топлива могут выполняться по схемам, как с внешним смесеобразованием, так и с внутренним, т.е. происходящим непосредственно в камере сгорания.

В бензиновых двигателях давление впрыска топлива не превышает 0,4...0,5 МПа.

Система впрыска топлива через одну форсунку (одноточечный или центральный впрыск)

В системе одноточечного впрыска (англ. *single point injection, SPI*) топливо периодически впрыскивается во впускной трубопровод одной форсункой с электромагнитным приводом, расположенной во впускном трубопроводе перед дроссельной заслонкой (рис. 26).

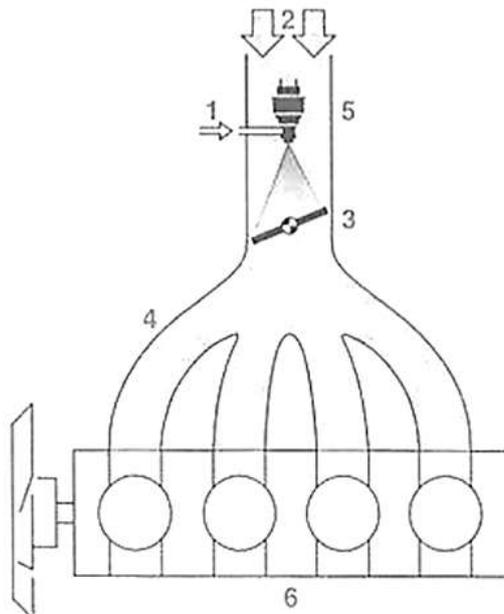


Рис. 26. Система одноточечного (центрального) впрыска топлива:
1) топливо; 2) воздух; 3) дроссельная заслонка; 4) впускной трубопровод;
5) форсунка; 6) двигатель [58]

По сравнению с карбюратором системы с центральным впрыском обеспечивали более простое и гибкое управление составом рабочей смеси, однако характеризовались определённой инерционностью и неравномерностью состава рабочей смеси, подаваемой в разные цилиндры. Это было связано с довольно большим и, что особенно важно, разным расстоянием от форсунки до впускных клапанов каждого цилиндра. Поэтому эта система довольно быстро сменилась многоточечным (распределённым) впрыском.

Системы многоточечного (распределённого) впрыска топлива

В системах многоточечного впрыска (англ. *multi point injection, MPI*) каждый цилиндр имеет свою форсунку, впрыскивающую топливо непосредственно на впускной клапан этого цилиндра (рис. 27).

Поскольку форсунки изготавливаются и управляются с высокой степенью точности, состав рабочей смеси в каждом цилиндре обеспечивается практически одинаковый. Расстояние от форсунки до впускного клапана минимально возможное и одинаковое для всех цилиндров. Поэтому инерционность такой системы очень мала, что очень важно для точного и быстрого регулирования состава рабочей смеси.

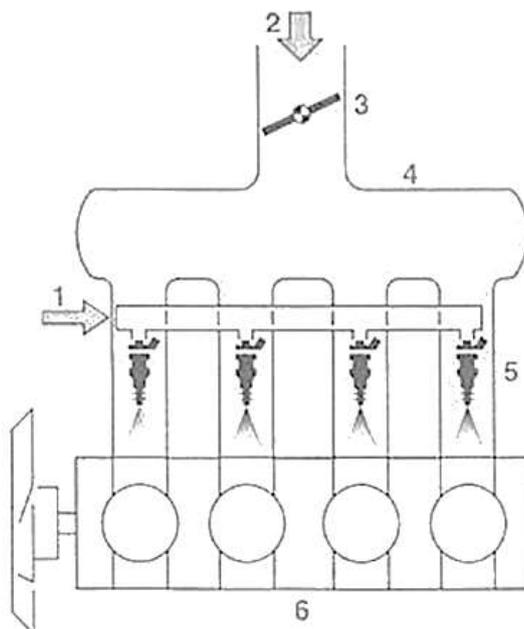


Рис. 27. Система многоточечного (распределённого) впрыска топлива:
1) топливо; 2) воздух; 3) дроссельная заслонка; 4) впускной трубопровод;
5) форсунки; 6) двигатель [58]

Однако у такой системы существует один недостаток. При запуске холодного двигателя распыляемое форсункой топливо попадает на холодные поверхности впускного трубопровода и впускного клапана, образуя плёнку из низкокипящих фракций топлива. Эта плёнка на протяжении нескольких рабочих циклов практически не участвует в процессе сгорания, но, испаряясь, формирует определённую долю несгоревших СН в ОГ. Чтобы минимизировать данный эффект, могут применяться форсунки, через которые в момент прогрева двигателя одновременно подаётся топливо и воздух (в т.ч. сжатый). Такие системы впрыска получили название «впрыск с воздушной поддержкой» (англ. *air assist injection, AAI*) или «впрыск с воздушным принуждением» (англ. *air forced injection, AFI*). В этих системах топливо подаётся в форсунки, где в специальной камере смешивается с поступающим туда же воздухом, и только после этого впрыскивается во впускной коллектор. Благодаря более высокому давлению впрыска и предварительному перемешиванию с воздухом формируется топливная струя с более мелкими каплями топлива (40 мкм для систем AAI и 15 мкм для систем AFI), чем в обычных системах впрыска (300 мкм). Это позволяет в период прогрева двигателя сократить выбросы СН на 50% [13].

Системы непосредственного впрыска топлива

В системах непосредственного впрыска (с внутренним смесеобразованием) топливо впрыскивается форсунками, размещёнными в каждом цилиндре, непосредственно в камеру сгорания (рис. 28).

Образование смеси в камере сгорания позволяет двигателю работать двумя совершенно разными способами. В условиях гомогенной смеси она распределена по своему составу однородно по всей камере сгорания, как и при внешнем смесеобразовании, — все количество находящейся в камере сгорания свежей смеси принимает участие в процессе сгорания. Поэтому такой режим используется, когда необходимо получение высокого крутящего момента. В условиях послойного распределения смеси она должна быть горючей только непосредственно возле свечи зажигания. В остальном объёме камеры сгорания находятся воздух и остаточные ОГ без следов топлива. Тем самым, на режимах холостого хода и частичной нагрузки создаётся, в

общем, весьма бедная смесь, что обеспечивает снижение расхода топлива и выброса продуктов неполного сгорания.

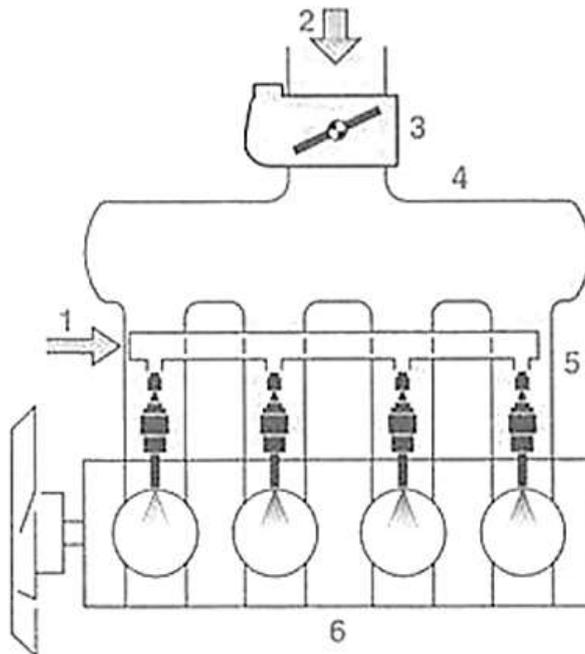


Рис. 28. Система непосредственного впрыска топлива: 1) топливо; 2) воздух; 3) электронно-управляемая дроссельная заслонка; 4) впускной трубопровод; 5) форсунки; 6) двигатель [58]

Совершенствование систем впрыска топлива ДВСВС

Жёсткие ограничения по уровню выбросов ЗВ с ОГ и уровню шума, наряду с требованиями к обеспечению более низкого расхода топлива, постоянно формируют новые требования к системе впрыска ДВСВС.

Система впрыска должна дозировать и подавать топливо с максимальной точностью под высоким давлением (в настоящее время — от 35 до 205 МПа) в камеру сгорания в нужном количестве и в нужный момент. При этом должно обеспечиваться хорошее смесеобразование, как при непосредственном впрыске, так и при впрыске в разделенные камеры сгорания (вихрекамерный или предкамерный впрыск) [102].

Основное различие между системами впрыска ДВСВС состоит в механизме создания высокого давления и типе управления открытием и закрытием форсунок.

Высокое давление впрыска создаётся плунжерными парами

(плунжер и гильза прецизионного изготовления¹) в топливных насосах высокого давления (ТНВД).

Классический рядный ТНВД для ДВСВС грузовых автомобилей создаёт давление в топливной магистрали высокого давления от 35 до 100 МПа. Распределительные ТНВД могут обеспечивать более высокое давление впрыска – от 60 до 120 МПа. В аккумуляторной системе впрыска Common Rail топливный насос создаёт давление от 130 до 150 МПа. Индивидуальные (на каждый цилиндр) ТНВД и насос-форсунки могут создавать давление до 205 МПа.

Чем выше давление впрыска, тем более мелкодисперсное распыление струи топлива можно обеспечить. Кроме того, скорость движения капелек топлива становится больше, а продолжительность впрыска – меньше. Это улучшает процессы смесеобразования и сгорания, протекающие в цилиндре ДВСВС.

Способы управления законом впрыскивания топлива должны обеспечивать учёт режима работы двигателя, параметры воздуха и топлива, других факторов, с целью обеспечения требований к экономичности и экологичности работы двигателя. Понятие «закон впрыскивания», характеризует процесс впрыскивания в камеру сгорания определенного количества топлива в зависимости от времени (рис. 29).

Механические системы управления системой впрыска позволяют учесть лишь наиболее важные факторы – положение органа подачи топлива, частоту вращения и атмосферное давление. Моменты открытия и закрытия форсунок определяются давлением P_0 , создаваемым ТНВД. Впрыск осуществляется за одну фазу (штрихпунктирная линия 1). Характерно плавное нарастание и спад давления, а также относительно низкое значение давления впрыска P_{s1} .

Наибольший контроль над законом впрыскивания топлива предоставляют электронные системы управления. Моменты открытия и закрытия форсунок задаются электромагнитными клапанами по сигналам, приходящим от электронного блока управления. Блок управления анализирует поступающие в него сигналы от датчиков

¹ Допуски на овальность и конусообразность плунжера и гильзы ТНВД составляют 0,2...0,6 мкм, высота микронеровностей и сборочные зазоры в сопряжениях 1,5...2 мкм.

положения органа подачи топлива, частоты вращения коленчатого вала, давления и температуры воздуха, охлаждающей жидкости, противодавления на сажевом фильтре и т.п. и формирует оптимальный закон впрыскивания, который может состоять из нескольких фаз (т.н. «фазированный впрыск»):

- фаза предварительного впрыскивания (2.1) предназначена для снижения уровня шума сгорания и образования NO_x , особенно в ДВСВС с непосредственным впрыском топлива;
- фаза основного впрыскивания (2.2) характеризуется интенсивным повышением давления для сокращения уровня образования NO_x и сажи при работе без рециркуляции ОГ, а также удержанием постоянного и высокого давления впрыска P_{s2} и последующим резким спадом давления для сокращения уровня образования сажи при работе с рециркуляцией ОГ;

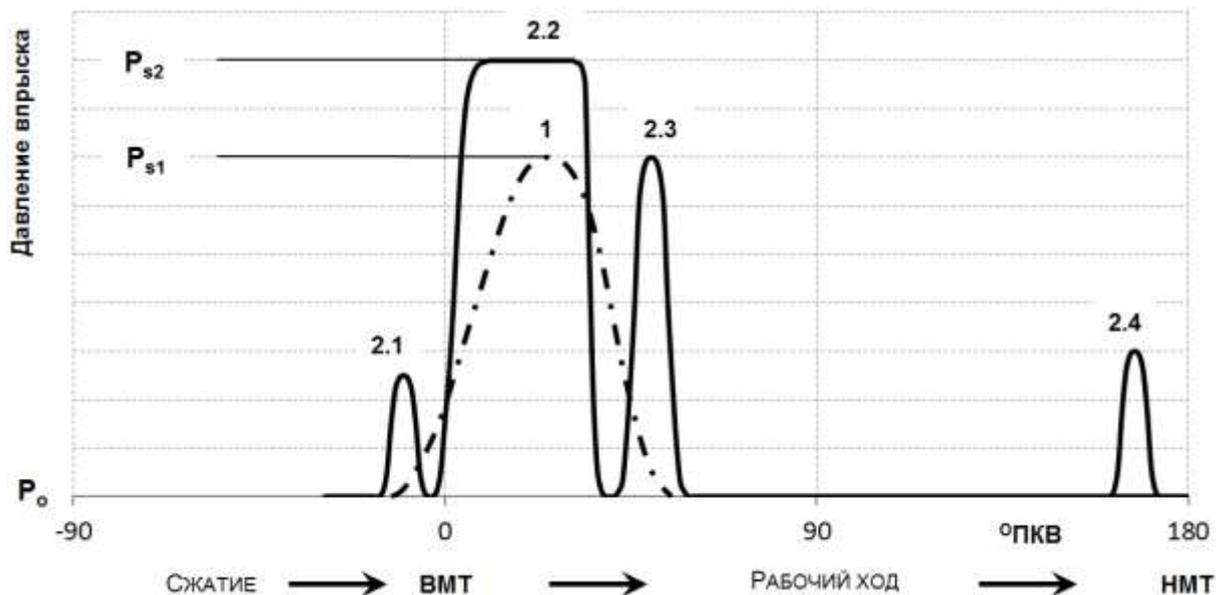


Рис. 29. Характерные фазы закона впрыскивания топлива для систем с механическим (1) и электронным (2.1...2.4) управлением [102]

- фаза дополнительного впрыскивания (2.3) непосредственно после основной фазы для сокращения уровня выбросов сажи (на 20...70%);
- фаза кратковременного периодического позднего дополнительного впрыскивания (2.4), осуществляемая для создания восстановительной среды в ОГ для десорбции аккумулирующего нейтрализатора NO_x и/или с целью повышения температуры ОГ для регенерации сажевого фильтра.

Особенно неблагоприятно на работе ДВСВС отражаются нежелательные подвпрыскивания. При подвпрыскивании форсунки самопроизвольно открываются ещё раз вскоре после закрытия, и в цилиндр к концу рабочего такта попадает плохо подготовленное топливо. Оно не сгорает частично или полностью и устремляется в виде несгоревших углеводородов в выпускной тракт. Быстро запираемые распылители с достаточно высоким давлением закрытия и низким остаточным давлением в подающей магистрали предотвращают этот неблагоприятный эффект [102].

Подобно подвпрыскиваниям на работе дизеля негативно сказывается наличие остаточных порций топлива, скапливающихся в носке корпуса распылителя, за уплотняющей поверхностью. Остающееся топливо испаряется после окончания сгорания и также частично устремляется в выпускной тракт, повышая уровень выбросов несгоревших углеводородов. Распылители, в которых отверстия рассверливаются в районе уплотнительного седла, имеют самые незначительные объёмы остаточных порций топлива [102].

Применение водных эмульсий дизельного топлива

Водные эмульсии дизельного топлива снижают образование NO_x , но при этом с увеличением количества воды падает мощность двигателя (при той же величине цикловой подачи, что и для 100% дизельного топлива). Уровень эмиссии CH увеличивается, в частности, при низкой нагрузке и/или холодном двигателе.

В водные эмульсии добавляют многочисленные присадки:

- эмульгаторы для стабилизации эмульсии;
- антикоррозионные присадки;
- средства против замерзания;
- смазывающие присадки;
- биозид или подобные добавки для уменьшения роста микроорганизмов и т. д.

Эмульсии испытывались на двигателях с рядными ТНВД. Преимущество эмульсий заключается в том, что выбросы NO_x на старых грузовиках на некоторый период времени можно снизить без дополнительных мероприятий. Для более новых систем впрыска водные

эмульсии не подходят, поэтому их появление на свободном рынке не планируется. Во многих современных системах питания температура топлива может превышать 100°C , при этом вода испаряется, а после охлаждения снова конденсируется в свободном виде, что вредно для топливной аппаратуры. При этом очень мелкие капли воды в эмульсии не отделяются от дизельного топлива сепаратором воды [102].

Воспламенение гомогенного заряда от сжатия

Воспламенение гомогенного заряда от сжатия (англ. *homogeneous charge compression ignition, HCCI*) – процесс, объединяющий признаки рабочих процессов традиционных ДВСПВ и ДВСВС. Впрыск топлива (как правило, бензина) осуществляется на такте впуска, поэтому в цилиндре двигателя на такте сжатия формируется относительно гомогенная рабочая смесь. Однако воспламенение смеси происходит не от искры зажигания, а за счёт самовоспламенения смеси, происходящего в момент, когда значения плотности и температуры, возрастающих по мере сжатия смеси, превышают определённый порог.

Пороговые значения плотности (т.е. концентрации реагентов) и температуры смеси достигаются следующими способами [62]:

- увеличением степени сжатия;
- предварительным нагревом всасываемого в цилиндр заряда;
- увеличением степени наддува;
- увеличением доли остаточных газов или степени рециркуляции отработавших газов.

Самовоспламенение смеси происходит очень быстро, практически по всему объёму камеры сгорания, так же, как это происходит при детонации. При потере контроля над протеканием данного процесса существует опасность поломки двигателя. Поэтому воспламенение гомогенного заряда от сжатия реализуется при работе двигателя на бедной смеси. При этом значение степени сжатия может достигать «дизельных» величин ($\epsilon > 15$), что сопровождается почти 30% улучшением эффективности рабочего процесса по сравнению с традиционным процессом с воспламенением смеси от искры. Горение бедной смеси происходит при относительно низкой температуре, что способствует существенному снижению образования NO_x , а гомогенность смеси

предотвращает появление условий для образования дисперсных частиц. Тем не менее, значения выбросов CO и CH с отработавшими газами не укладываются в существующие жёсткие нормы, поэтому для очистки ОГ требуется применение каталитического нейтрализатора. Кроме того, организация процесса НСЦИ позволяет регулировать мощность не за счёт дросселирования всасываемого потока (т.н. «количественное» регулирование мощности), а за счёт изменения состава рабочей смеси (т.н. «качественное» регулирование мощности), что ведёт к снижению «насосных» потерь и, следовательно, росту эффективности.

Контрольные вопросы к разделу

1. Перечислите и охарактеризуйте основные направления совершенствования рабочего процесса ДВСПВ с целью улучшения его энерго-экологических характеристик.
2. Перечислите и охарактеризуйте основные направления совершенствования рабочего процесса ДВСВС с целью улучшения его энерго-экологических характеристик.
3. В чём суть технологии рециркуляции ОГ? В чём отличие «внешней» от «внутренней» рециркуляции ОГ? Как влияет рециркуляция ОГ на энерго-экологические характеристики ДВС?
4. С чем связана необходимость увеличивать энергию искры?
5. Что называется «минимальной» и «насыщающей» энергией искрового зажигания?
6. Что называется «пробивным» напряжением? Какие факторы влияют на это напряжение?
7. Из каких основных элементов состоит батарейная система зажигания?
8. Опишите особенности и области применения тиристорных или ёмкостных систем зажигания.
9. Опишите особенности и области применения транзисторных или индуктивных систем зажигания.
10. Каким образом переход от контактных к бесконтактным системам зажигания повлиял на величину энергии искры?
11. Опишите особенности «плазменных» систем зажигания.
12. Что называется углом опережения зажигания? Для чего он нужен? Что называют оптимальным углом опережения зажигания?

13. Что такое детонация? Каковы причины и последствия её возникновения?
14. Как влияет изменение угла опережения зажигания на энерго-экологические характеристики ДВСПВ?
15. Как влияет изменение угла опережения впрыска топлива на энерго-экологические характеристики ДВСВС?
16. Что называют фазами газораспределения? Что такое перекрытие клапанов? Из каких соображений выбирают величину угла перекрытия клапанов?
17. Как осуществляется регулирование фаз газораспределения? Как это влияет на энерго-экологические характеристики ДВС?
18. Что такое полновариантное регулирование газораспределения? Какие преимущества оно обеспечивает?
19. Для чего используют резонаторные трубки и резонансные камеры в конструкции впускного трубопровода?
20. Для чего используют управляемые заслонки в конструкции впускного трубопровода?
21. Как организуется послойное смесеобразование в ДВСПВ? Как это влияет на энерго-экологические характеристики ДВС?
22. Какими преимуществами и недостатками обладают форкамерные ДВСПВ и вихрекамерные ДВСВС?
23. Из каких соображений выбирается степень сжатия ДВСПВ и ДВСВС?
24. Как регулируется степень сжатия в зависимости от режима работы ДВСПВ с изменяемой степенью сжатия?
25. В чём отличие цикла Миллера/Аткинсона от цикла Отто? Назовите преимущества и недостатки цикла Миллера/Аткинсона.
26. Как влияет наддув на энерго-экологические характеристики ДВС?
27. Какие существуют виды нагнетателей? Укажите их преимущества и недостатки.
28. Каким образом осуществляется регулирование давления наддува в зависимости от режима работы ДВС?
29. В чём отличие «внутреннего» и «внешнего» смесеобразования?
30. Опишите принцип работы одноточечного, многоточечного и непосредственного впрыска топлива в ДВСПВ.

31. Какие функции обеспечивает система впрыска топлива в ДВСВС?
32. Какие значения давления впрыска обеспечивают ТНВД различных типов?
33. Какие фазы реализуются при электронном управлении законом впрыскивания топлива в ДВСВС?
34. Что такое «подвпрыскивание» топлива? Как оно влияет на выбросы несгоревших углеводородов?
35. Для чего применялись водные эмульсии дизельного топлива? Почему не планируется широкое распространение этих эмульсий?
36. В чём заключаются особенности организации воспламенения гомогенного бензинового заряда от сжатия? Какие преимущества и недостатки имеет данная технология?

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВС

В тех случаях, когда не удаётся снизить выбросы загрязняющих веществ до желаемого уровня при помощи совершенствования рабочего процесса в двигателе, применяют методы очистки отработавших газов.

Отличают очистку ОГ от дисперсных частиц, которая, как правило, осуществляется при помощи фильтров, и очистку от газообразных ЗВ, которая выполняется методами абсорбции, нейтрализации и адсорбции.

Методы жидкостной абсорбции

Принцип действия **абсорберов** (иногда называемых жидкостными нейтрализаторами) основан на растворении или химическом взаимодействии токсичных компонентов ОГ при пропускании их через жидкий абсорбент определенного состава: воду, водный раствор сульфита натрия, водный раствор двууглекислой соды и т.п.

Пропускание ОГ дизелей через воду обеспечивает степень очистки от NO_x до 50%, от альдегидов – до 98%, от SO_2 – до 99%.

Жидкостные нейтрализаторы не требуют времени для выхода на рабочий режим после пуска холодного двигателя. Однако есть и недостатки: большая масса и габариты, необходимость частой смены абсорбента, неэффективность по отношению к СО, работа, как правило, только при положительных температурах.

В настоящее время такие устройства применяются лишь при работе специализированной техники в замкнутых пространствах (например, шахтах или складских помещениях).

Методы нейтрализации

Нейтрализация – процесс организации таких химических реакций, которые преобразуют токсичные химические соединения, содержащиеся в ОГ, в нетоксичные. В автомобильных ДВС используют методы термической и каталитической нейтрализации.

Термическая нейтрализация

Термическая нейтрализация СО и СН основана на активизации

процесса окисления этих ЗВ до CO_2 и H_2O в выпускной системе двигателя посредством турбулентного смешивания воздуха с ОГ при высоких температурах.

Подача воздуха в выпускной коллектор может осуществляться двумя способами: при помощи всасывания воздуха в выпускной коллектор с применением малоинерционных «клапанов-пульсаров», и при помощи принудительного нагнетания воздуха специальным насосом.

Эффективный процесс окисления CH начинается при температуре 400°C , а CO при температуре не менее 500°C . При обычных условиях движения АТС в городе температура ОГ является слишком низкой для активной термической нейтрализации. Повысить температуру ОГ можно за счёт снижения потерь тепла в выпускной системе (термоизоляция выпускного коллектора), однако и этого оказывается недостаточно. Термическая нейтрализация не получила широкого распространения из-за своей низкой эффективности.

Каталитическая нейтрализация

Наиболее распространенный метод нейтрализации ОГ в ДВС в настоящее время – каталитический. **Каталитические нейтрализаторы** служат для дожигания (окисления) продуктов неполного сгорания (CH , CO) и разложения (восстановления) окислов азота (NO_x).

В настоящее время существуют две разновидности автомобильных каталитических нейтрализаторов:

- **окислительные двухкомпонентные**, которые доокисляют CO и CH , содержащиеся в ОГ, до углекислого газа CO_2 и воды H_2O ;
- **окислительно-восстановительные трёхкомпонентные**, которые наряду с доокислением CO и CH одновременно восстанавливают из оксидов азота NO_x молекулярный азот N_2 .

Окислительные двухкомпонентные каталитические нейтрализаторы в настоящее время применяются в составе некоторых систем противотоксичности ДВСВС, а также в ДВСПВ, работающих на природном газе по технологии «бедного сгорания» (англ. *lean burn*).

Большинство ДВСПВ в настоящее время оснащаются системами противотоксичности с трёхкомпонентными окислительно-восстановительными каталитическими нейтрализаторами.

Катализаторы для автомобильных нейтрализаторов

Катализатором называют вещество, способное увеличивать скорость определённых химических реакций. Наиболее важные параметры любого катализатора – активность и селективность. Активность – способность катализатора инициировать тот или иной химический процесс. Она обычно характеризуется степенью превращения реагирующих компонентов при определенной температуре

$$\eta = \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (7)$$

где η – эффективность нейтрализации;

ΔC – изменение концентрации ЗВ в ходе реакции нейтрализации;

C_0 – исходная концентрация ЗВ.

Для сопоставления различных катализаторов и оценки изменения их эффективности в процессе работы обычно используют зависимость между степенью превращения и температурой.

Температура начала эффективной нейтрализации ($T_{\text{мин}}$) является важнейшим показателем катализатора, так как определяет скорость его прогрева после холодного пуска двигателя. В условиях городского движения автомобиля катализаторы с $T_{\text{мин}}$ выше 300°C могут вообще не вступать в работу.

Максимальная рабочая температура ($T_{\text{макс}}$) определяет устойчивость катализатора к перегреву. Технические требования на автомобильные катализаторы определяют $T_{\text{макс}}$ на уровне $1100\dots 1200^\circ\text{C}$. Катализаторы при кратковременном нагреве до этих температур не должны разрушаться, оплавляться, а материал носителя не должен терять своих свойств.

Термин **селективность** характеризует способность катализатора из нескольких возможных реакций ускорять те, которые ведут к достижению желаемого результата. Например, в автомобильных нейтрализаторах может протекать ряд побочных реакций, в результате которых образуются соединения, представляющие собой самостоятельную опасность для окружающей среды или существенно снижающих эффективность процесса нейтрализации. Наиболее опасными из таких соединений являются аммиак (NH_3) и закись азота (N_2O), образующиеся

при восстановлении NO_x , и серный ангидрид (SO_3), выделяющийся при окислении SO_2 . При наличии избыточного кислорода аммиак снова может превращаться в NO . Поэтому катализатор, используемый для восстановления NO_x должен обладать высокой селективностью, т.е. обеспечивать приоритетное протекание реакции в направлении образования молекулярного азота N_2 , а не NH_3 и N_2O .

В настоящее время в автомобильных нейтрализаторах в качестве катализаторов наиболее широко используются «благородные» металлы платиновой группы:

- платина (Pt) – для окисления CO ;
- палладий (Pd) – для окисления CH ;
- родий (Rh) – для восстановления NO_x .

Типы носителей для автомобильных нейтрализаторов

Процесс нейтрализации, происходящий в автомобильном нейтрализаторе, состоит из трёх элементарных подпроцессов, протекающих одновременно: химических реакций, массообмена и диффузии.

Процесс нейтрализации происходит при прохождении ОГ через слой носителя с нанесённым на его поверхность катализатором. **Носителем** называется пространственная структура, выполненная из керамики или жаропрочной стали, предназначенная для организации движения ОГ и формирования максимально возможной площади контакта ОГ с катализатором.

В автомобильных нейтрализаторах катализатор наносят на носитель (керамический или металлический), формирующий сотообразные каналы для прохождения ОГ. Поверхность каналов покрывают слоем пористого оксида алюминия Al_2O_3 для ещё большего увеличения площади поверхности контакта ОГ с катализатором. Один грамм такой подложки создает поверхность до 25 м^2 . Кроме оксида алюминия в качестве подложки могут использоваться оксид кремния, диоксид церия, диоксид титана, оксид циркония и цеолиты.

Геометрическая форма и структура носителя определяет тип конструкции нейтрализатора. Существуют два типа носителя катализатора: **гранулированный** и **блочный**. Основным достоинством нейтрализаторов с гранулированным носителем является возможность

замены вышедшего из строя катализатора. К числу недостатков нейтрализаторов подобного типа относятся высокое гидравлическое сопротивление, недостаточно полное использование активной поверхности гранул из-за наличия застойных зон и интенсивное истирание и унос катализатора из реакционной зоны.

Использование блочных носителей позволяет уменьшить объём, массу, площадь поперечного сечения, а также скорость прогрева при холодных пусках [63].

Блочные носители могут выполняться из сотовой керамической структуры, пенометалла или гофрированной металлической фольги. Наиболее распространённым керамическим материалом является кордиерит – синтетический керамический материал с очень низким коэффициентом теплового расширения. Металлическая фольга изготавливается из жаропрочного железо-хром-алюминиевого сплава [64].

Керамические блочные носители претерпели существенные изменения своих характеристик. Если в 1974 г. плотность ячеистых каналов составляла 31 ячейку/см² при толщине стенок каналов 0,305 мм, то уже к концу 1970-х появились образцы с плотностью каналов 46...62 ячейки/см² и толщиной стенки 0,15 мм. В начале 2000-х образцы керамических блочных носителей имели плотность до 186 ячеек/см² и толщину стенки 0,05 мм. Аналогичным образом эволюционировали и металлические носители: если в конце 1970-х толщина фольги составляла 0,05 мм, то в начале 2000-х удалось уменьшить её толщину до 0,025 мм, а плотность каналов увеличить до 155 ячеек/см² [67].

Экспериментальные образцы носителей обеспечивают плотность ячеистых каналов до 300 ячеек/см² у керамических блоков и до 800 ячеек/см² у металлических блоков, что обеспечивает высокую активную поверхность при сохранении достаточных прочностных качеств блока-носителя [65].

Прогресс в технологии изготовления носителей позволил улучшить характеристики нейтрализаторов. Чем больше плотность каналов, тем с большей поверхностью катализатора соприкасаются ОГ, а следовательно, растут эффективность и долговечность устройства. Меньшая толщина стенок означает меньшую термальную инерционность,

что приводит к более быстрому прогреву нейтрализатора, а также к меньшему аэродинамическому сопротивлению, что минимизирует влияние нейтрализатора на рабочий процесс в камере сгорания ДВС. Кроме того, улучшение термостойкости носителей и катализаторов позволили располагать нейтрализаторы вплотную к выпускному коллектору ДВС или даже использовать схемы, включающие стартовые нейтрализаторы, внедрённые в конструкцию выпускного коллектора, что обеспечило быстрый прогрев нейтрализатора и его выход на режим эффективной работы.

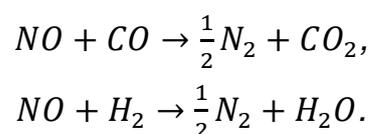
Изначально носители покрывались катализатором равномерно по всей поверхности, однако уже к началу 2000-х появились технологии, позволяющие распределять катализатор неравномерно, добиваясь большей эффективности или специфических свойств (например, нанесение катализатора только в передней части сажевого фильтра придаёт этой зоне свойства окислительного нейтрализатора, что используется для регенерации фильтра).

В некоторых случаях каталитически активные материалы внедряются непосредственно в состав керамики таким образом, что после формовки керамический носитель уже не нужно покрывать катализатором сверху. Такое решение используется, например, при изготовлении нейтрализаторов SCR [67].

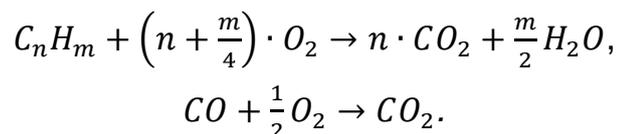
Принцип работы трёхкомпонентного каталитического нейтрализатора

В начале 1970-х годов появились системы противотоксичности с двухкамерными окислительно-восстановительными нейтрализаторами.

На рис. 30 показана схема двухкамерного каталитического нейтрализатора, служащего для восстановления NO_x в первой камере и окисления CO и CH во второй. В первой камере под действием катализатора (Rh) происходит восстановление оксида азота по реакциям:



Во второй камере, служащей для окисления CO и CH в присутствии дополнительно вводимого воздуха и катализаторов (Pt, Pd), процесс окисления происходит по реакциям:



Для обеспечения восстановительной среды в первой камере нейтрализатора необходимо, чтобы в ОГ не было кислорода. Для этого в двигатель подавалась обогащённая рабочая смесь, близкая по своему составу к стехиометрической. Уже при $\alpha > 1,02$ активность катализатора к NO_x резко уменьшается, т.к. среда становится окислительной.

Во второй камере, наоборот, среда должна быть окислительной, что обеспечивалось подачей дополнительного подогретого воздуха. В качестве устройств, обеспечивающих подачу дополнительного воздуха в нейтрализатор, использовались нагнетатели ротационного типа, приводимые во вращение от коленчатого вала двигателя или клапаны-пульсары (малоинерционные обратные клапаны, срабатывающие от импульсов разряжения, возникающих в выпускном коллекторе двигателя).

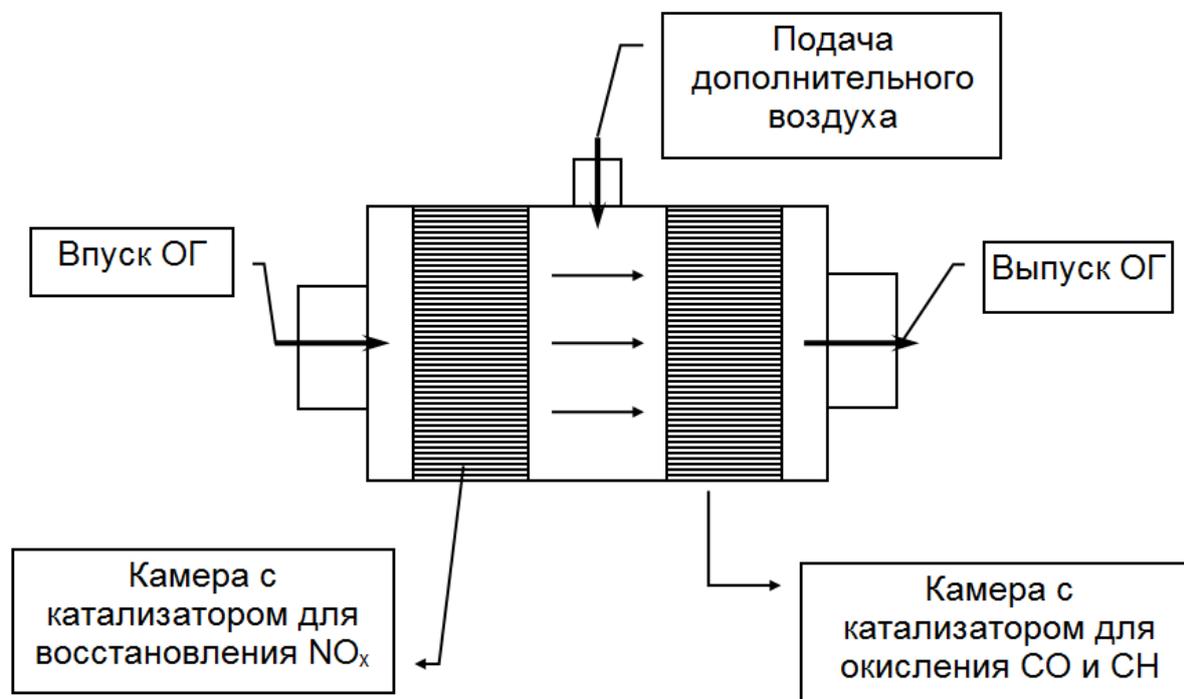


Рис. 30. Схема работы двухкамерного трехкомпонентного окислительно-восстановительного нейтрализатора ОГ ДВС

Эффективность каталитического нейтрализатора зависит от температуры ОГ и типа катализатора, продолжительности контакта ОГ с

поверхностью катализатора, наличия в ОГ примесей. Особенно заметно снижается эффективность нейтрализаторов при использовании топлива, содержащего свинец, серу, железо и марганец, а также моторных масел¹, содержащих в составе присадок фосфор.

С появлением систем питания с распределённым впрыском и электронным управлением каталитические нейтрализаторы производят по однокамерной схеме. При этом для нормальной работы трехкомпонентного нейтрализатора необходимо на большинстве режимов работы двигателя подавать в него рабочую смесь строго стехиометрического состава ($\alpha=1$) (рис. 31). Это обеспечивает как минимум 80% эффективность нейтрализации всех трёх ЗВ в ОГ (т.н. «окно» бифункциональности).

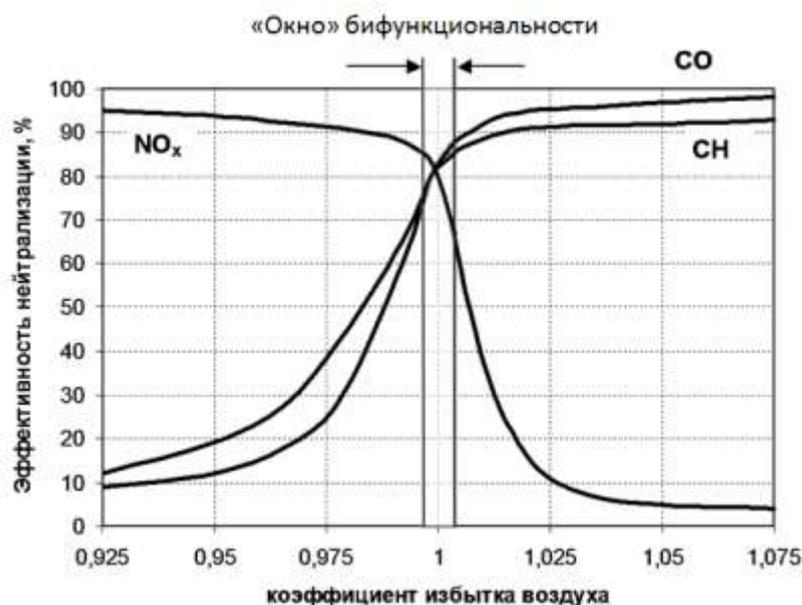


Рис. 31. «Окно» бифункциональности однокамерного трёхкомпонентного нейтрализатора ($\alpha = 0,995...1,005$)

Для наибольшей эффективности процесса нейтрализации ОГ разработаны комплексные системы снижения токсичности, состоящие из собственно нейтрализатора и электронного блока управления составом смеси с обратной связью (λ -зонда), а также электронного блока защиты нейтрализатора от перегрева (рис. 32).

¹ Небольшое количество моторного масла, распределяемого по станкам цилиндров, попадает в камеру сгорания и участвует в процессе сгорания.

Датчик концентрации кислорода O_2 (λ -зонд) монтируется в выпускном коллекторе перед нейтрализатором. Он определяет концентрацию кислорода в отработавших газах, создает напряжение U_s в соответствии с составом рабочей смеси и направляет этот сигнал в электронный контроллер управления (ЭКУ) двигателем.

Когда в отработавших газах появляется кислород, λ -зонд создает низкое напряжение. ЭКУ оценивает это как высокое содержание воздуха в рабочей смеси – то есть, как бедную смесь.

Когда в отработавших газах имеется низкое содержание кислорода, λ -зонд создает высокое напряжение. ЭКУ оценивает это как низкое содержание воздуха в рабочей смеси – то есть, как обогащенную смесь.

Сигналы λ -зонда подаются в ЭКУ, который на основе их анализа управляет подачей топлива V_E в двигатель, посредством изменения напряжения U_V , определяющего продолжительность открытия топливных форсунок. Время реакции «бедная-богатая» и «богатая-бедная» составляет 300...500 миллисекунд.

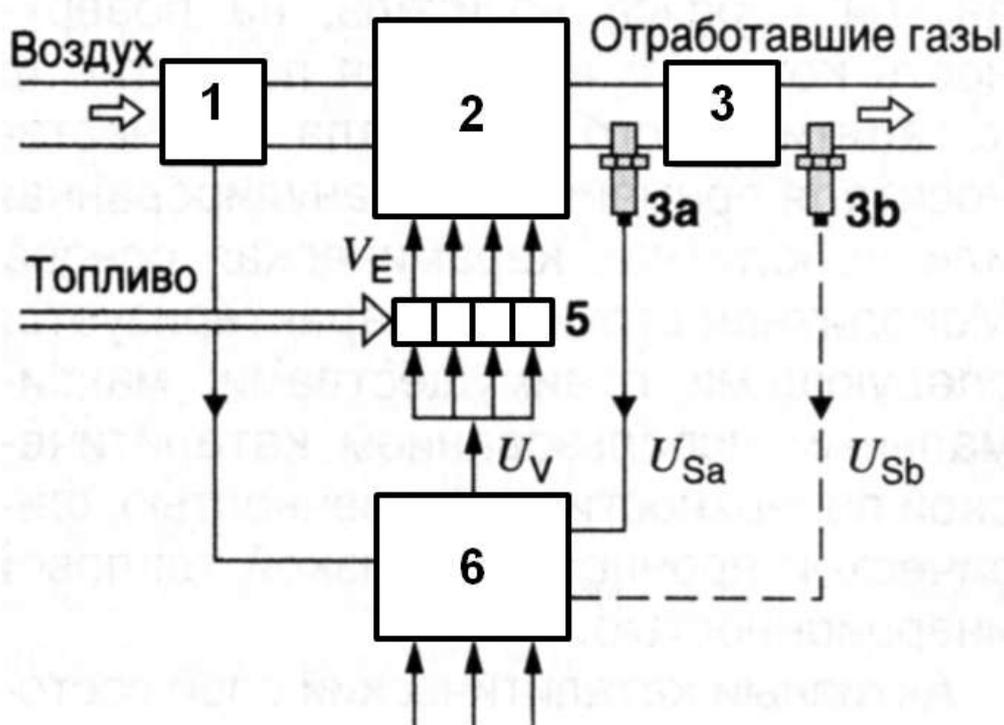


Рис. 32. Схема системы управления составом рабочей смеси с обратной связью: 1) – датчик массового расхода воздуха; 2) – двигатель; 3a) – первый λ -зонд (управляющий); 3b) – второй λ -зонд (диагностический); 4) – нейтрализатор; 5) – форсунки; 6) – ЭКУ [66]

На отдельных моделях автомобилей применяется два кислородных датчика: один устанавливается до каталитического нейтрализатора, другой – после. Применение двух кислородных датчиков усиливает контроль за составом ОГ и обеспечивает эффективную работу нейтрализатора.

В зависимости от конструкции различают два вида кислородных датчиков: двухточечный и широкополосный.

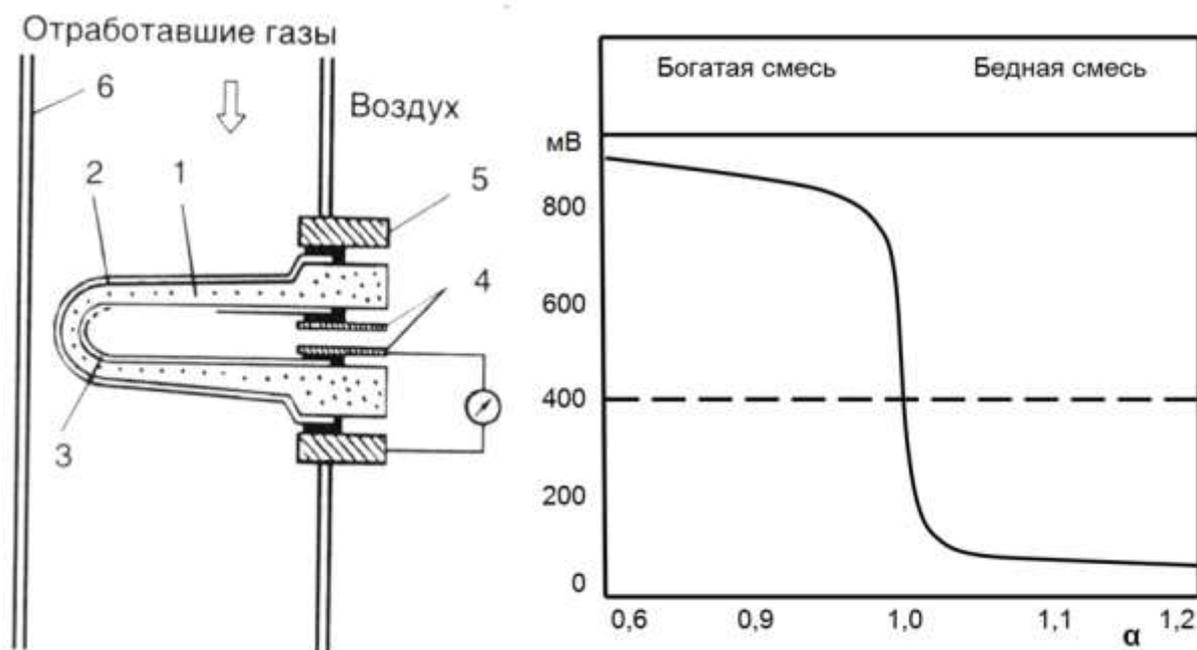


Рис. 33. Двухточечный кислородный датчик (λ -зонд) и его характеристика при температуре 600°C : 1) – твёрдый электролит ZrO_2 ; 2) – Pt наружный электрод; 3) – Pt внутренний электрод; 4) – контакты; 5) – корпусной контакт; 6) – выхлопная труба [66]

Двухточечный кислородный датчик (рис. 33) состоит из элемента, изготовленного из диоксида циркония (вид керамики), покрытого изнутри и снаружи тонким слоем платины. Этот элемент имеет высокое электрическое сопротивление при низких температурах и поэтому не позволяет току проходить через него, когда он холодный. При высоких температурах ионы кислорода проходят через элемент вследствие разницы в концентрациях кислорода в воздухе и в потоке ОГ. Это устанавливает разницу электрического потенциала, которую платина усиливает. Таким образом, при работе ДВС на богатой рабочей смеси имеется большое различие в концентрациях кислорода внутри (ОГ) и

снаружи (атмосфера) элемента λ -зонда, поэтому датчик создаёт относительно сильное напряжение (примерно 1 В). С другой стороны, если смесь бедная, есть лишь небольшое различие между концентрацией кислорода в воздухе и концентрацией кислорода в ОГ, поэтому датчик O_2 создает напряжение, близкое к нулю.

Широкополосный кислородный датчик представляет собой современную конструкцию λ -зонда. Он применяется в качестве входного датчика каталитического нейтрализатора. В широкополосном датчике значение коэффициента избытка воздуха определяется с использованием силы **тока закачивания**.

Широкополосный кислородный датчик состоит из двух керамических элементов – двухточечного и закачивающего. Под закачиванием понимается физический процесс, при котором кислород из ОГ проходит через закачивающий элемент под воздействием определенной силы тока.

Принцип работы широкополосного кислородного датчика основан на поддержании постоянного напряжения (450 мВ) между электродами двухточечного элемента за счет изменения силы тока закачивания.

Снижение концентрации кислорода в ОГ (обогащенная топливно-воздушная смесь) сопровождается ростом напряжения между электродами двухточечного керамического элемента. Сигнал от элемента подается в электронный блок управления, на основании которого создается ток определенной силы на закачивающем элементе.

Ток, в свою очередь, обеспечивает закачку дополнительного кислорода в измерительный зазор двухточечного датчика и напряжение на нём достигает нормативного значения. Величина силы тока при этом является мерой концентрации кислорода в ОГ.

При обеднении топливно-воздушной смеси работа широкополосного кислородного датчика осуществляется аналогичным образом. Отличие состоит в том, что под действием тока происходит выкачивание кислорода из измерительного зазора наружу.

Эффективная работа кислородного датчика осуществляется при температуре более 300°C. Для скорейшего достижения рабочей температуры λ -зонд оборудуется нагревателем.

Решение проблемы холодного запуска ДВС

Было установлено, что у двигателей, оборудованных системой снижения выбросов с каталитическим нейтрализатором, порядка 90% всех выбросов СО и СН при испытаниях по стандартному ездовому циклу происходит в течение первых двух или трех минут после запуска двигателя из холодного состояния. Связано это с неэффективностью работы нейтрализатора вплоть до момента его прогрева до рабочей температуры.

Поэтому разработано немало методов ускорения прогрева нейтрализатора и выхода его на эффективный режим работы.

Так, большое распространение получили методы утепления выпускной системы путём керамических покрытий на стенках выпускных трактов или использования штампованных стальных выпускных труб с воздушным (теплоизолирующим) зазором. Для ускоренного прогрева нейтрализатора уменьшается угол опережения зажигания, что приводит к росту температуры ОГ. Так как на режиме прогрева двигателя система питания приготавливает рабочую смесь обогащённого состава, для обеспечения окислительной среды в ОГ подаётся дополнительная порция воздуха с помощью специального насоса.

Другим методом является применение **стартового нейтрализатора** уменьшенного размера, устанавливаемого в непосредственной близости от выпускного коллектора. В качестве катализатора обычно используется палладий, как более устойчивый к высоким температурам. Для повышения долговечности стартового нейтрализатора практикуется его установка в байпасном патрубке для выключения после прогрева основного нейтрализатора.

Использовались и другие методы, включая адсорберы из специального материала, которые встраивались в выпускную систему близко к двигателю и адсорбировали СН при низких температурах, выделяя их обратно в поток ОГ после прогрева, когда начал полноценно функционировать основной нейтрализатор. Адсорбент в таких устройствах быстро «отравляется» серой, содержащейся в топливе. Поэтому топливо должно быть малосернистым.

Рассматриваются также способы ускорения прогрева основного нейтрализатора с использованием электричества (что вызывает быструю

разрядку стандартных аккумуляторов, но может оказаться более практичным для гибридных автомобилей), путём сжигания дополнительного топлива в горелке, устанавливаемой перед нейтрализатором, или путём подачи в нейтрализатор специально для этой цели вырабатываемого и хранящегося на борту автомобиля водорода.

Очистка ОГ ДВСПВ при работе на бедной смеси

Чтобы трёхкомпонентный каталитический нейтрализатор работал эффективно, в двигатель необходимо подавать стехиометрическую рабочую смесь ($\alpha=1$). ДВСПВ с непосредственным впрыском топлива работает на бедной смеси ($\alpha=1,5...1,7$, что позволяет снизить расход топлива до 10%), при этом концентрации СН и СО в ОГ, поступающих в нейтрализатор из двигателя, уменьшаются, но в ОГ появляется кислород, препятствующий эффективному восстановлению в нейтрализаторе NO_x .

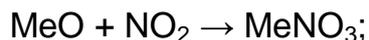
В настоящее время существует три основных способа решения этой проблемы.

Первый способ — попытаться найти катализатор, который будет восстанавливать NO_x , несмотря на окислительную среду в нейтрализаторе. Некоторые фирмы (Mitsubishi GDI – иридиевый катализатор) имели определенный успех, в основном используя субстрат, образованный из пористого керамического материала, известного под названием цеолит, но эффективность нейтрализации NO_x при этом составляла всего около 30% по сравнению с 80% у трехкомпонентного нейтрализатора. Учитывая, что при этом проводилась активная политика воздействия на рабочий процесс с целью уменьшения образования NO_x (рециркуляция ОГ, уменьшение угла зажигания и т.п.), то эффективность нейтрализации в 30% иногда оказывалась достаточной, для того чтобы итоговые выбросы NO_x не превышали законодательные нормы.

Второе направление заключается в применении адсорбции NO_x . Механизм адсорбции NO_x в нейтрализаторе протекает в следующей последовательности:

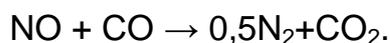
- NO с помощью кислорода окисляется до NO_2 на платиновом катализаторе;
- NO_2 реагирует с оксидами металлов (например, с оксидом бария) и

трансформируется в нитраты этих металлов:



- образовавшиеся нитраты адсорбируются в специальном отсеке нейтрализатора [69].

Длительное время адсорбция происходить не может, поэтому нейтрализатор должен регулярно регенерироваться. Для этого системой управления двигателем индуцируется фаза работы на обогащённой рабочей смеси ($\alpha < 1$), когда в нейтрализаторе создаются восстановительные условия. При этом накопленные нитраты разлагаются с выделением NO, который, в свою очередь, восстанавливается до молекулярного азота:



После завершения регенерации адсорбента двигатель вновь переходит на работу на обеднённой рабочей смеси. Процесс циклически повторяется.

В качестве адсорбентов используются щёлочноземельные элементы, но их отравляет сера, содержащаяся в топливе. Поэтому этот тип **накопительно-восстановительного нейтрализатора** (англ. *NO_x storage catalyst, NSC*) очень чувствителен к наличию в бензине примесей серы и может быть использован только тогда, когда доступно топливо с гарантированно низким содержанием серы (<0,001% по массе).

Необходимость регенерации адсорбента определяется по сигналу, формируемому **датчиком содержания оксидов азота** в ОГ. Датчик устанавливается за накопительным нейтрализатором. Конструктивно датчик NO_x включает две камеры, две насосные ячейки, несколько электродов и подогреватель. Сенсорный элемент датчика состоит из диоксида циркония, в котором при наличии разности потенциалов отрицательно заряженные ионы кислорода перемещаются от отрицательного электрода к положительному электроду.

Принцип работы датчика NO_x основан на измерении количества кислорода. В первой (насосной) камере из ОГ удаляется кислород, который препятствует процессу восстановления оксидов азота во второй камере. При подаче напряжения на электроды датчика молекулы

кислорода распадаются на ионы и протекают через твердый электролит из диоксида циркония. Во второй (восстановительной) камере оксиды азота распадаются на азот и кислород. Протекающий при этом между электродами ток пропорционален содержанию образовавшегося кислорода (а, значит, и оксидов азота) в ОГ.

Датчик NO_x имеет собственный блок управления, расположенный на минимальном расстоянии от датчика. Такая компоновка снижает внешние помехи при передаче сигналов датчика. Блок управления усиливает сигналы датчика и передает их в блок управления двигателем.

Третий способ кардинально отличается от первых двух. Он заключается в создании **поля газовой плазмы** внутри нейтрализатора. Газы высокой концентрации, проходя через это поле, разлагаются на составляющие их химические элементы. Затем CO и NO_x могут быть преобразованы в углекислый газ и азот. Для уменьшения выбросов CH устанавливается простой окислительный нейтрализатор [64]. Однако для того, чтобы такая система работала эффективно, требуется большой расход электричества высокого напряжения.

Ограничение выбросов при работе двигателей на бедных смесях усложняется в связи с тем, что они работают на этих смесях только на малых и средних нагрузках. На режимах полной нагрузки все современные бензиновые двигатели работают при $\alpha=1$, и поэтому для очистки ОГ здесь нужен обычный трехкомпонентный каталитический нейтрализатор. В действительности новое поколение двигателей нуждается в комбинации двух нейтрализаторов, один – трёхкомпонентный, другой – для снижения выбросов NO_x при работе на бедной смеси.

Очистка отработавших газов ДВСВС

Отработавшие газы ДВСВС отличаются от ОГ ДВСПВ тем, что в них всегда присутствует кислород (т.к. дизель работает на бедной смеси), а их температура на $200...300^\circ\text{C}$ ниже. Кроме того, состав ОГ ДВСВС заметно отличается от состава ОГ ДВСПВ: в дизельном выхлопе концентрации CO и CH значительно меньше, однако присутствуют дисперсные частицы, состоящие в основном из сажи.

Очистка ДВСВС от дисперсных частиц

Для снижения выбросов дисперсных частиц используются керамические **сажевые фильтры** (англ. *diesel particulate filter, DPF*). Керамические фильтры задерживают не менее 95% мелкодисперсных (размером менее 100 мкм) дисперсных частиц по массе и не менее 99% по количеству во всём диапазоне возможных режимов работы двигателя [67]. Однако задерживаемые ДЧ забивают поры фильтрующего материала, увеличивая аэродинамическое сопротивление фильтра.

Периодическую очистку фильтра производят, увеличивая температуру фильтра до 500°C и более. При этом частицы, которые в основном состоят из сажи, сгорают (окисляются) с образованием CO₂. Такие фильтры называются «регенерируемые». Регенерируемые фильтры очень хорошо работают в грузовых автомобилях, двигатели которых большую часть времени работают в области больших нагрузок, где температура ОГ достаточно высока, чтобы происходила регенерация.

Но в городских условиях двигатели автомобилей много времени работают в области малых нагрузок и частот вращения коленчатого вала. При этом температура ОГ не достигает даже 300°C.

Для решения этой проблемы используется одно или комбинация нескольких мероприятий, направленных на периодическое повышение температуры фильтра:

- введение в топливо присадок, уменьшающих температуру, необходимую для регенерации фильтра FAP[™] (фр. *filtre a particules*);
- установка на входе в фильтр нескольких свечей накаливания мощностью $\cong 1,2$ кВт. Перед и после фильтра устанавливаются датчики давления, измеряющие противодавление, создаваемое фильтром. Когда датчики давления подают сигнал о том, что фильтр забит сажей, происходит включение свечей накаливания, которые «подогревают» ОГ до требуемой температуры регенерации;
- установка перед сажевым фильтром окислительного нейтрализатора, который, окисляя специально впрыскиваемую «регенерирующую» порцию испарённого топлива, повышает температуру ОГ, необходимую для регенерации каталитического дизельного фильтра дисперсных частиц (англ. *catalyzed diesel particulate filter, CDPF*) или каталитического сажевого фильтра (англ. *catalyzed soot filter, CSF*).

Наиболее распространённой является система CDPF, регенерация сажевого фильтра в которой представляет собой следующий процесс. Когда блок управления двигателем, анализируя сигналы датчиков давления, расположенных перед и после фильтра, определяет необходимость его очистки, запускается процесс активной регенерации. При этом выполняются следующие функции:

- прекращается рециркуляция ОГ, чтобы повысить температуру сгорания топлива;
- производится дополнительный впрыск небольшой порции топлива, подаваемого после основной дозы (см. раздел «Совершенствование систем впрыска топлива ДВСВС»);
- снижается подача воздуха в двигатель посредством регулируемой дроссельной заслонки с электроприводом;
- давление наддува поддерживается на уровне, при котором обеспечивается незаметность регенерации для водителя.

Дополнительная порция топлива в испарённом состоянии (СН) доокисляется (догорает) в установленном перед сажевым фильтром окислительном нейтрализаторе, разогревая тем самым отработавшие газы до температуры 600...650°C, необходимой для выгорания сажи (окисления до CO₂). Кроме того, содержащийся в ОГ NO доокисляется в окислительном нейтрализаторе до NO₂, который также реагирует с сажей, образуя молекулярный азот и CO₂, причём эта реакция протекает уже при 250°C.

Как только сажа выгорит, о чём засвидетельствует изменение противодавления, оказываемого фильтром, двигатель возвращается к обычному режиму работы. После проведения активной регенерации полностью восстанавливается способность фильтра задерживать содержащуюся в ОГ сажу. Регенерация выполняется через каждые 500...700 км пробега. Её продолжительность составляет примерно 5...10 минут. Процесс регенерации происходит незаметно для водителя.

В системе FAP[™], разработанной специалистами концерна PSA Peugeot Citroen, температура, необходимая для сгорания сажи, может быть достигнута только при использовании цериесодержащей присадки, которая автоматически регулярно впрыскивается в дизельное топливо из отдельного резервуара.

Цериесодержащая присадка представляет собой жидкий коллоидный раствор дизельного топлива с микрогранулами церия. Микрогранулы состоят из частиц церия, заключённых в нерастворимой оболочке из вещества, по своим свойствам напоминающего желатин. Благодаря своему свойству при окислении (сгорании) выделять большое количество тепла церий дополнительно разогревает ОГ.

Во время такта выпуска ОГ, когда выпускные клапаны открыты, происходит «послевпрыск¹» небольшой порции топлива, содержащего присадку, в поток ОГ, вытесняющихся поршнем из цилиндра. ОГ, уже частично охлаждённые, не вызывают воспламенение церия, а лишь испаряют желатиновую оболочку микрогранул. В предварительно разогретом виде и с испарённой оболочкой частицы церия попадают на уже разогретую до необходимой температуры (400...500°C) поверхность FAP™-фильтра и в присутствии кислорода отработавших газов и углерода сажи мгновенно воспламеняются, поджигая частички сажи и этим локально поднимая температуру до 1000°C.

Это, с одной стороны, не приводит к повреждению керамической решётки фильтра, а с другой стороны, максимально быстро и в полном объёме окисляет не только частицы сажи, но и более сложные составляющие ОГ дизельного двигателя.

Присадка хранится в отдельной бачке, ёмкостью 3...5 л, которой хватает на 80...120 тыс. км пробега (срок службы фильтра). Конструктивно бачок может находиться в топливном баке или вне его. Уровень присадки в бачке контролируется с помощью датчика поплавкового типа. В топливный бак присадка подается с помощью электрического насоса. Подача присадки осуществляется при каждой заправке топливного бака пропорционально запрашиваемому объёму топлива. Начало и продолжительность подачи присадки регулируется блоком управления двигателем (в некоторых конструкциях отдельным электронным блоком).

Побочным эффектом применения присадки является то, что при сгорании она оседает в виде золы на стенки фильтра и не выводится из

¹ Позднее дополнительное впрыскивание может вести к разжижению моторного масла дизельным топливом, поэтому применение этого процесса должно быть согласовано с производителем двигателей.

него, что сокращает ресурс устройства.

«Ахиллесовой пятой» сажевого фильтра является то, что при движении АТС в условиях городских пробок он может быть быстро закупорен частицами сажи, а система автоматической регенерации не сможет запуститься из-за низкой температуры ОГ или других причин. В этом случае мощность и крутящий момент двигателя упадут, и автомобиль «перестанет ехать». Для обеспечения нормальной регенерации сажевого фильтра в руководствах по эксплуатации производители иногда рекомендуют «...время от времени активировать процесс регенерации фильтра, проезжая примерно 40 км со скоростью 80 км/ч на низких передачах, либо двигаться в обычном режиме, также используя низшую из возможных передач...». Проблема состоит в том, что обычный водитель не всегда имеет возможность осуществить действия, предписанные руководством по эксплуатации. Сажевый фильтр забивается сажей ещё больше и, в конце концов, может выйти из строя. По этой причине сажевые фильтры имеют ограниченный срок службы, который, судя по имеющимся данным, составляет порядка 120...200 тыс. км.

Если условия эксплуатации не благоприятствуют автоматическому включению процесса очистки сажевого фильтра, предусмотрена процедура принудительной регенерации, запускаемая с помощью оборудования сервисных станций, куда и следует обращаться в подобных случаях.

Очистка ОГ ДВСВС от газообразных ЗВ

Легковые дизельные автомобили до уровня Евро-3 оборудовались окислительным каталитическим нейтрализатором, который обеспечивал практически полное окисление выбросов СН и СО до водяного пара и СО₂. При этом проблема снижения выбросов NO_x, решалась насколько возможно воздействием на рабочий процесс ДВСВС. Степень рециркуляции ОГ и угол опережения впрыска топлива устанавливались на максимально возможном уровне даже в ущерб экономичности (на 5...10%) и уровню выделения сажи (до 60%). Для очистки ОГ от сажи использовалась система с регенерируемым фильтром.

Однако такая стратегия не обеспечивает достижения нормативных

показателей Евро-4 и выше. Для наиболее радикального снижения выбросов NO_x была разработана система **селективной каталитической нейтрализации** (англ. *selective catalytic reduction, SCR*). SCR возникла не вдруг – уже десятилетия она используется в стационарных установках для очистки отработавших газов на электростанциях. Принцип её действия прост: аммиак, добавляемый в качестве восстановителя, в нейтрализаторе вступает в реакцию с окислами азота, содержащимися в ОГ, в результате чего образуются безвредный азот и водяной пар (рис. 34). В качестве катализаторов в устройствах данного типа применяют платину, оксид ванадия или цеолиты (Iron Zeolites, ZSM-5).

Эффективность нейтрализатора оценивается при помощи датчика содержания оксидов азота в ОГ. Если Эффективность нейтрализатора меньше определенной величины, загорается сигнальная лампа «Check Engine» в комбинации приборов.

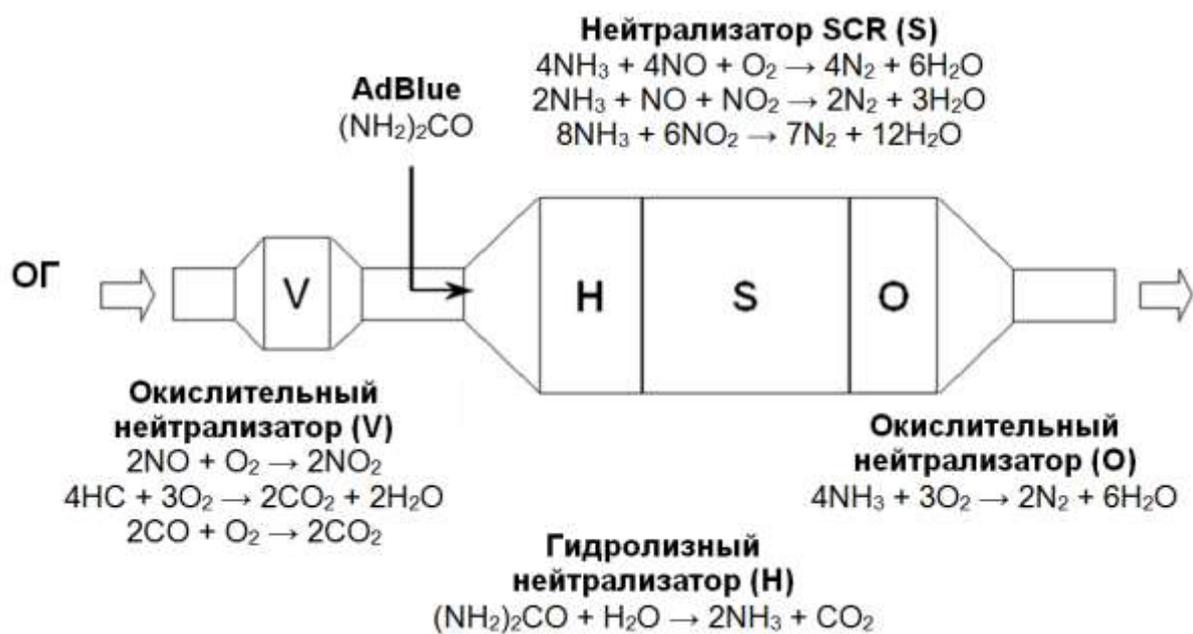


Рис. 34. Пример реализации системы SCR [68]

Однако транспортировка большого объема токсичного аммиака допускается только с существенными ограничениями, поэтому в автомобилях вместо аммиака применяется синтетический 32,5% водный раствор карбамида (мочевины), получившей торговое название AdBlue¹.

¹ В США используется другое название – *Diesel exhaust fluid, DEF*.

Его состав внесён в стандарт DIN 70070. Расход AdBlue для выполнения норм Евро-4 составляет примерно 6% от расхода дизельного топлива. Это значит, что его запас можно пополнять каждый раз при выполнении планового ТО. Раствор AdBlue замерзает при минус 11,5°C, поэтому бак для его хранения и трубопроводы должны подогреваться при более низкой температуре окружающего воздуха.

В технологии SCR сочетается экологичность и экономичность. Она выбрана ведущими производителями грузовых автомобилей в Европе среди конкурирующих систем, поскольку решает одновременно несколько задач:

- имеет эффективность нейтрализации NO_x более 90%;
- сочетается с дизельным топливом разного качества (по содержанию серы);
- не требует специального обслуживания и рассчитана на весь срок службы автомобиля;
- никак не сказывается на интервалах между техобслуживанием и заменой масла;
- снижает расход топлива на 5...10% по сравнению с автомобилями, реализующими стратегию высокой рециркуляции ОГ;
- система SCR эффективно работает уже при температуре около 250...300°C;
- увеличивает дальность пробега автомобиля при условии, что он оборудован баком для AdBlue соответствующей ёмкости.

Уменьшение NO_x может быть достигнуто также за счёт применения селективных по отношению к этим ЗВ катализаторов, которые уже упоминались при изучении методов очистки ОГ ДВСПВ, работающих на бедных смесях. Примерами могут служить использование в качестве катализатора «медно замещённого» цеолита ZSM5, эффективного только при высоких температурах, и платино-алюминиевого сплава, имеющего меньшую рабочую температуру. Платиновый нейтрализатор, который используется на бедных смесях в дизельных легковых автомобилях, работает при температурах 180...300°C с эффективностью восстановления NO_x порядка 40% [69].

В некоторых случаях могут применяться системы с адсорбцией NO_x на специальной подложке. Регенерация адсорбирующего слоя

происходит при временном обогащении смеси.

Наконец, решением проблемы может быть плазменное поле, упоминавшееся ранее.

Снижение выбросов СН (ЛОС)

Выбросы **летучих органических соединений** (ЛОС), образующиеся в результате испарения топлива из системы питания ДВС, могут улавливаться с помощью **систем контроля топливных испарений** (англ. *evaporative emission control, EVAP*), устанавливаемых непосредственно на транспортных средствах.

Технология EVAP, которая, как правило, используется для уменьшения выбросов ЛОС в результате испарения топлива из системы питания транспортных средств с бензиновыми двигателями, включает адсорбер (с соответствующими подводными и отводными трубками) и систему десорбции (регенерации адсорбера) с регулируемым сжиганием ЛОС в двигателе (рис. 35).

Основа данной системы состоит из адсорбера, заполненного гранулами активированного угля, который поглощает пары бензина, поступающие из топливного бака. Продувка предназначена для регенерации адсорбера. Процессом регенерации управляет электромагнитный клапан, расположенный между адсорбером и впускным коллектором. При работе двигателя на режимах больших нагрузок этот клапан автоматически открывается, инициируя продувку адсорбера подогретым воздухом и подачу десорбированных паров топлива во впускной коллектор двигателя.

В двигателях, оснащенных турбонаддувом, разрежение воздуха во впускном коллекторе отсутствует. Поэтому производители включают в систему улавливания паров топлива дополнительные двухходовые клапаны. Срабатывая, они принудительно толкают пары бензина внутрь впускного коллектора.

Выбросы ЛОС, образующиеся в ходе заправки автомобиля топливом на заправочных станциях, могут улавливаться специальным оборудованием, включённым в состав заправочной станции.

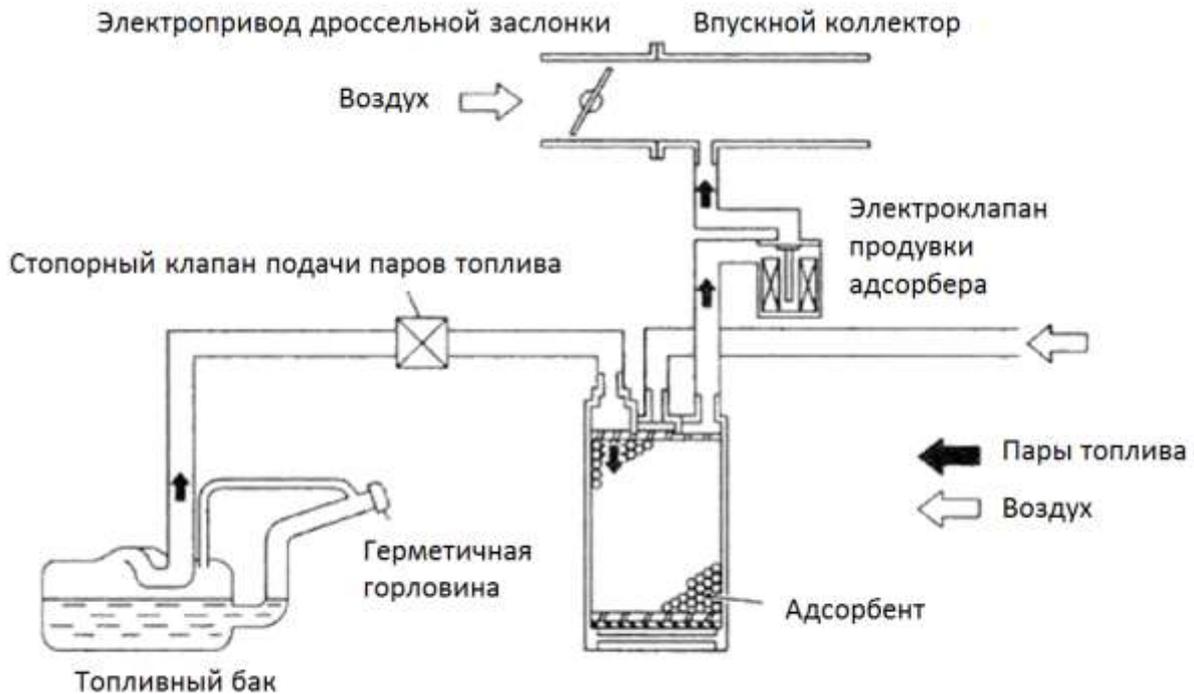


Рис. 35. Схема системы улавливания паров топлива на автомобиле

Контрольные вопросы по разделу

1. В чём заключается суть метода жидкостной абсорбции, используемого для очистки ОГ ДВС?
2. В чём заключается суть метода термической нейтрализации, используемого для очистки ОГ ДВС?
3. Какие типы автомобильных каталитических нейтрализаторов существуют и где они применяются?
4. Что называют катализатором? Какими параметрами характеризуется катализатор? Какие вещества используются в качестве катализаторов?
5. Какие существуют типы носителей для автомобильных нейтрализаторов? Каковы их характеристики?
6. Опишите принцип работы трёхкомпонентного окислительно-восстановительного каталитического нейтрализатора.
7. Чем отличаются однокамерная и двухкамерная схемы конструкции трёхкомпонентного окислительно-восстановительного каталитического нейтрализатора? Что такое «окно бифункциональности» нейтрализатора?

8. Нарисуйте и объясните схему системы управления составом рабочей смеси с обратной связью.
9. Объясните принцип действия двухточечного и широкополосного кислородного датчика (λ -зонда).
10. Какие существуют решения проблемы неэффективности нейтрализатора при запуске холодного двигателя?
11. Какие существуют способы очистки ОГ ДВСПВ, работающих на бедных смесях?
12. Объясните принцип действия датчика NO_x .
13. Опишите принцип работы каталитического дизельного сажевого фильтра. Какие методы используются для осуществления регенерации этого фильтра?
14. Какие методы применяются для очистки ОГ ДВСВС от газообразных ЗВ?
15. Опишите принцип работы селективного каталитического нейтрализатора (SCR). Какое вещество используется в этом устройстве для восстановления оксидов азота?
16. Каким образом происходит предотвращение выбросов испарений топлива (ЛОС) из системы питания автомобиля?

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ АВТОТРАНСПОРТНЫЕ ТОПЛИВА

Бензин и дизельное топливо благодаря своим уникальным свойствам заняли в XX веке лидирующие позиции в качестве автотранспортного топлива. Однако, будучи произведёнными из ископаемой нефти, они относятся к невозобновляющимся (исчерпаемым) ресурсам, крайне неравномерно распределённым по регионам Земли, что приводит к политическим и экономическим проблемам. Кроме того, сжигание этих топлив приводит к дестабилизации геохимического углеродного цикла за счёт «вброса» в атмосферу дополнительного углерода, ранее входившего в состав геологических залежей нефти, что является одной из причин глобального изменения климата. По этим и ряду других причин в настоящее время ведутся интенсивные исследования по поиску альтернативного энергообеспечения автотранспорта.

Основными альтернативами бензину и дизельному топливу на автотранспорте считаются:

- метан (природный газ) и биометан (биогаз);
- пропан-бутан (углеводородный газ);
- оксигенаты (спирты и эфиры) и биооксигенаты;
- синтетические топлива и биотоплива;
- водород и биоводород.

Часть этих альтернатив также относятся к невозобновляющимся ресурсам, поскольку производятся из ископаемых топлив, а часть – к возобновляющимся, поскольку производятся из биоресурсов или с использованием условно «бесконечной» солнечной (или геотермальной, гравитационной) энергии.

Современные технологии позволяют осуществлять практически любые трансформации углеводородных топлив, формируя заданную структуру молекул. В принципе, любую органическую субстанцию можно разложить до уровня синтез-газа (смеси H_2 и CO), а затем синтезировать топливо, подходящее для использования в ДВСПВ или ДВСВС. Синтез-газ можно даже получать из воды и углекислого газа, содержащегося в воздухе. Однако для этих преобразований необходима значительная энергия. Если для преобразований использовать энергию ископаемых

топлив, то эффективность при оценке жизненного цикла конечных энергоносителей оказывается слишком низкой. Если же для выращивания первичного биосырья и для дальнейших преобразований использовать «бесплатную» солнечную энергию, то уровень эффективности в жизненном цикле оказывается всё более конкурентоспособным по сравнению с традиционными нефтяными топливами.

Энергоэффективность производства альтернативных биотоплив – не единственный «подводный камень» на пути их широкого применения на транспорте. Широко обсуждаются следующие проблемы:

- конкуренция между «биотопливной» и «пищевой» сельскохозяйственной продукцией;
- стимулирование уничтожения естественных экосистем в борьбе за необходимую для выращивания «биотопливного» сырья территорию;
- ограниченность «экологически устойчивой» сырьевой базы для производства биотоплив;
- необходимость создания специфической сети распределения биотоплив и специфических двигателей, способных на них работать;
- высокие логистические издержки при перевозках сырья и биотоплива.

Исходя из специфики первичного сырья, используемого для производства биотоплив, они классифицируются на четыре «поколения».

Первое поколение – источником сырья для производства биотоплива являются сахара, жиры или крахмал, извлечённые из «пищевых» растений. В данном случае конкуренция между биотопливом и пищевыми продуктами проявляется наиболее явно.

Второе поколение – источником сырья для производства биотоплива являются целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин или пектин, содержащиеся в составе растительных отходов сельского или лесного хозяйства или специально выращиваемых непищевых растений. Конкуренция с пищевыми продуктами в данном случае ослабляется.

Третье поколение – источником сырья для производства биотоплива являются водные автотрофные организмы (т.е. водоросли и цианобактерии), специально культивируемые на территориях или акваториях, не пригодных для выращивания сельскохозяйственной продукции. Конкуренция с пищевыми продуктами в данном случае

практически отсутствует. Теоретическая продуктивность микроводорослей в оптимальных условиях составляет порядка 100 г/м^2 в день, однако в реальных условиях продуктивность достигает $15\text{...}20 \text{ г/м}^2$ в день. Некоторые виды данных организмов могут напрямую производить водород, этанол или алканы. В качестве макробиогенов, необходимых для выращивания таких организмов, может использоваться техногенный углекислый газ, а в качестве микробиогенов – сточные воды. Данное направление находится пока в стадии лабораторных исследований и небольших пилотных проектов, однако представляется весьма многообещающим.

Четвёртое поколение биотоплив представляет собой синтетические аналоги бензина и дизельного топлива, производимые из биомассы, полученной по технологиям, аналогичным технологиям второго и третьего поколения биотоплив. Эти технологии устраняют необходимость модернизации двигателей автомобилей и топливозаправочной инфраструктуры.

Для всесторонней оценки преимуществ и недостатков тех или иных альтернативных топлив и схем приводов используется методология оценки жизненного цикла. В некоторых странах применение этой методологии обязательно для получения финансирования новых технологий [70].

Некоторые наиболее важные характеристики автотранспортных топлив представлены в прил. 1.

Метан (природный газ) и биометан (биогаз)

Получение

Метан – основной компонент природного газа, ($87\%\text{...}97\%$ по объёму), попутного нефтяного газа ($31\%\text{...}90\%$ по объёму), рудничного газа ($34\text{...}40\%$ по объёму).

В анаэробных условиях (в болотах, переувлажнённых почвах, кишечнике жвачных животных) метан образуется биогенно в результате жизнедеятельности некоторых микроорганизмов. В этом случае он входит в состав биогаза и называется биометаном. Биогаз получают и промышленным способом из органических отходов и сточных вод в ходе

их **анаэробного сбраживания**. Название биометан (биогаз) призвано подчеркнуть биологический характер его происхождения, что позволяет рассматривать его как возобновляющийся источник энергии с низким «углеродным следом» с позиции оценки жизненного цикла.

Большие запасы метана сосредоточены в метаногидратах на дне морей и в зоне вечной мерзлоты, однако пока эти ресурсы не используются.

Свойства

Природный газ (ПГ) – смесь газов, в основном углеводородов. Кроме метана (CH_4), природный газ содержит в небольших концентрациях следующие газы: этан (C_2H_6); пропан (C_3H_8); бутан (C_4H_{10}); пентан (C_5H_{12}); азот, кислород и углекислый газ.

В России по физико-химическим показателям ПГ должен соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 10 [71, 72].

Метан проявляет наркотические свойства; однако действие ослабляется его малой растворимостью в воде (0,02 г/кг) и крови. Метан по токсикологической характеристике относится к веществам 4-го класса опасности по ГОСТ 12.1.007. Однако имеются данные, что метан относится к токсическим веществам, действующим на центральную нервную систему [73].

Предельно допустимая концентрация ПГ в воздухе рабочей зоны (ПДК_{РЗ}) не должна превышать 300 мг/м³ в пересчете на углерод (ГОСТ 12.1.005). ПДК_{РЗ} сероводорода – 10 мг/м³, сероводорода в смеси с углеводородами $\text{C}_1\dots\text{C}_5$ – 3 мг/м³.

ПГ относится к группе веществ, способных образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Концентрационные пределы воспламенения газа (по метану) в смеси с воздухом при температуре 293К (20°C) и нормальном давлении — 5%...15% (по объёму). Для ПГ конкретного состава концентрационные пределы воспламенения определяют в соответствии с ГОСТ 12.1.044.

Относительная плотность метана составляет 0,554 (т.е. он почти вдвое легче воздуха), поэтому при утечках он быстро рассеивается в атмосфере.

Таблица 10

Нормируемые показатели КПГ для ДВС

Наименование показателя	Значение	Метод испытания
1. Объёмная теплота сгорания низшая, кДж/м ³ , не менее	31800	По ГОСТ 22667
2. Относительная плотность к воздуху	0,55...0,70	По ГОСТ 22667
3. Расчетное октановое число ПГ по моторному методу, не менее	105	По формуле (18)
4. Концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,02	По ГОСТ 22387.2
5. Концентрация меркаптановой ¹ серы, г/м ³ , не более	0,036	По ГОСТ 22387.2
6. Масса механических примесей в 1 м ³ , не более	1,0	По ГОСТ 22387.4
7. Суммарная объёмная доля негорючих компонентов, %, не более	7,0	По ГОСТ 23781
8. Объёмная доля кислорода, %, не более	1,0	По ГОСТ 23781
9. Концентрация паров воды, мг/м ³ , не более	9,0	По ГОСТ 20060

Примечание: значения показателей установлены при температуре 293 К (20°C) и давлении 0,1013 МПа.

Расчётное октановое число РОЧ вычисляют по формуле

$$РОЧ = \frac{\sum_{i=0}^n ОЧ_i \cdot C_i}{\sum_{i=0}^n C_i}, \quad (8)$$

где $ОЧ_i$ – октановое число i -го горючего компонента ПГ;

C_i – объёмная доля i -го горючего компонента ПГ в смеси;

n — количество горючих компонентов ПГ, определённых анализом.

¹ В терминологии IUPAC название «меркаптаны» признано устаревшим и вместо него рекомендуется использовать название «тиолы». Тиолы – сернистые аналоги спиртов общей формулы RSH, где R – углеводородный радикал, например, метантиол (метилмеркаптан) (CH₃SH), этантиол (этилмеркаптан) (C₂H₅SH) и т.д. Низшие алифатические тиолы являются легколетучими жидкостями с отвратительным запахом, причём их запах ощущается обонянием человека в чрезвычайно низких концентрациях — 10⁻⁷...10⁻⁸ моль/л. Это свойство используется для одорирования природного газа, не имеющего запаха – добавка летучих тиолов (16 г на 1000 м³) к газу позволяет обнаруживать утечки газа людьми по запаху.

Октановые числа горючих компонентов ПГ приведены в табл. 2.

Метан является парниковым газом, более сильным в этом отношении, чем CO_2 , из-за более интенсивного поглощения инфракрасного спектра электромагнитного излучения. Если степень воздействия CO_2 на климат условно принять за единицу, то парниковая активность того же молярного объёма CH_4 составит 21...25 единиц [74].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

ПГ в ДВС может использоваться в двухтопливном или монотопливном вариантах. В двухтопливном исполнении выпускаются (или переоборудуются) как ДВСПВ, так и ДВСВС (газодизели). Монотопливный вариант, позволяющий более полно использовать особенности ПГ, реализуется в ДВСПВ.

Особенности ПГ, к которым следует адаптировать двигатель, заключаются в следующем.

1) Теплотворная способность стехиометрической рабочей смеси с ПГ на 10...15% меньше, чем рабочей смеси с бензином. Кроме того, газообразное состояние топлива несколько уменьшает коэффициент наполнения цилиндра. Совместное влияние этих факторов приводит к снижению мощности двигателя (до 15% в двухтопливных ДВСПВ). Тем не менее, благодаря высокому октановому числу природного газа появляется возможность за счёт увеличения степени сжатия монотопливных ДВСПВ (до 12,5) полностью устранить этот недостаток.

2) Высокое октановое число ПГ означает, что для активации реакции горения требуется затратить больше энергии ($\approx 0,3$ МДж), чем в случае воспламенения бензина ($\approx 0,25$ МДж). Кроме того, ПГ содержит относительно большую долю атомов водорода, нежели бензин, поэтому в ОГ увеличивается доля образующейся при сгорании воды, которая в момент запуска холодного двигателя конденсируется на поверхности камеры сгорания и шунтирует электроды свечи зажигания. Оба этих обстоятельства затрудняют запуск холодного двигателя, особенно при низких температурах окружающего воздуха. Поэтому в монотопливных ДВСПВ система зажигания обеспечивает более мощную искру.

3) Скорость горения ПГ меньше скорости горения бензина, поэтому

необходимо перенастраивать фазы работы клапанов и увеличивать угол опережения зажигания (примерно на $5...10^\circ$ ПКВ).

4) Благодаря более «прочной» молекуле метан труднее окисляется в нейтрализаторе, поэтому требуется установка нейтрализатора повышенного объёма.

5) ДВСПВ, работающие на ПГ, имеют возможность более широкой регулировки состава рабочей смеси ($0,8 < \alpha < 1,8$). При этом «мощностной» состав рабочей смеси с ПГ $\alpha=1,03...1,05$, а «экономичный» состав – $\alpha=1,15...1,5$. Это позволяет повысить экономичность этих двигателей на $10...15\%$, используя комбинированное (количественное и качественное) регулирование мощности [75].

Часть производителей монотопливных ДВСПВ придерживалась технологии «бедного сгорания» (англ. *lean-burn*), которая обеспечивала в начале 1990-х годов снижение выбросов ЗВ примерно вдвое по сравнению с дизелями того же времени производства.

В дальнейшем, в связи с принятием более жёстких норм на выбросы ЗВ с ОГ ДВС, производители предпочли наиболее «чистую» стратегию «стехиометрического сгорания» при одновременном использовании 3-компонентного нейтрализатора ОГ. Двигатели, реализующие данную стратегию, показывают результаты, с запасом удовлетворяющие требования Евро-6 к уровню выбросов. Так, двигатель IVECO Cursor-8 CNG обеспечивает снижение удельных выбросов по сравнению с уровнем Евро-6: по NO_x – на 70%, по ДЧ – на 96%, по NMHC – на 90%, по CH_4 – на 80% [76]. Уровень выбросов NMHC и NO_x сравним с выбросами газовых электростанций при производстве электроэнергии, необходимой для движения электромобиля [77].

При этом следует отметить, что для достижения таких результатов используется относительно простая и отработанная технология очистки ОГ. Для двигателя IVECO Cursor-8 CNG (рабочий объём 7,8 л, мощность 270/330 кВт) система очистки ОГ состоит из трёхкомпонентного нейтрализатора, двух λ -датчиков и одного датчика температуры, общим весом 45 кг. Для аналогичного (Евро-6) дизельного двигателя IVECO Cursor-9 система очистки ОГ состоит из окислительного нейтрализатора, объединённого с сажевым фильтром, нейтрализатора SCR с системой хранения и впрыска мочевины, 3 датчиков температуры, 2 датчиков

давления, 2 датчиков NO_x , и одного датчика NH_3 , общим весом ≈ 250 кг [76].

ДВС, работающие на ПГ, генерируют меньше шума, чем дизельные аналоги (для упомянутых выше двигателей IVECO, шум при измерении в реверберационной камере сократился на ≈ 5 дБА, а при измерении в момент холодного запуска – на 9...13 дБА).

У ДВС, работающих на ПГ, отмечается снижение износа цилиндрово-поршневой группы и возможность более редкой замены моторного масла, что связано с отсутствием эффекта разбавления масла топливом, а также с более низким уровнем образования в цилиндре коррозионно агрессивных оксидов серы и азота. Метан сгорает полностью, не образуя твердых частиц и золы, вызывающих повышенный износ цилиндрово-поршневой группы. Таким образом, использование ПГ в качестве моторного топлива позволяет увеличить срок службы двигателя в 1,5...2 раза.

Вследствие большего содержания воды в продуктах сгорания газозоообразных смесей в газовых двигателях могут возникать проблемы водостойкости моторных масел, также газовые двигатели более чувствительны к образованию зольных отложений в камере сгорания. Поэтому сульфатная зольность масел для газовых двигателей ограничивается более низкими значениями, а требования к гидрофобности моторного масла повышаются.

Хранение на борту автомобиля

Проблема хранения ПГ на борту автомобиля заключается в его газообразном состоянии при стандартных условиях¹. Плотность ПГ при стандартных условиях почти в 1000 раз меньше плотности жидких топлив. Поэтому приходится применять способы увеличения плотности хранения ПГ на борту автомобиля.

Природный газ можно хранить на борту автомобиля:

- в компримированном (сжатом) до 20...38 МПа виде в высокопрочных баллонах; в этом случае говорят о «**компримированном природном газе**» – КПГ;

¹ Стандартные условия – 25°C, 100 кПа.

- в сжиженном виде при температуре $-160^{\circ}\text{C} \dots -122^{\circ}\text{C}$ и давлении $0,2 \dots 1,0$ МПа в термоизолированных сосудах; в этом случае говорят о «**сжиженном природном газе**» – СПГ;
- в адсорбированном виде при давлении около $3,5 \dots 4,4$ МПа в ёмкостях различной конфигурации; в этом случае говорят об «**адсорбированном природном газе**» – АПГ.

По сравнению с жидкими топливами системы хранения ПГ на борту автомобиля отличаются:

- большим занимаемым объёмом;
- большей массой;
- большими затратами энергии на заправку.

Плотность метана при стандартных условиях – $0,6682$ кг/м³ (удельная низшая теплота сгорания – $32,74$ МДж/м³ или ≈ 49 МДж/кг). При давлении 20 МПа и температуре 25°C метан имеет плотность хранения 135 кг/м³ (6615 МДж/м³). Адсорбированный ПГ при $4,0$ МПа имеет плотность хранения до 110 кг/м³ (5390 МДж/м³). Сжиженный метан при температуре -168°C имеет плотность 415 кг/м³ (20335 МДж/м³). Для сравнения – плотность бензина составляет порядка 750 кг/м³, а удельная низшая теплота сгорания – ≈ 44 МДж/кг, т.е. плотность хранения энергии составляет ≈ 33000 МДж/м³.

Таким образом, для замены 50-литрового бензобака потребуется: 81-литровый «термос» для СПГ или 306-литровая ёмкость для АПГ или 249-литровый баллон для КПГ.

В реальных системах хранения указанные показатели на $15 \dots 30\%$ хуже.

Удельный вес систем хранения КПГ при использовании различных баллонов составляет:

- цельнометаллических баллонов – порядка 6 кг/СТДм³,
- стальных баллонов с обмоткой из стекловолокна – порядка $4,0$ кг/СТДм³,
- цельноалюминиевых баллонов – порядка $3,2$ кг/СТДм³,
- алюминиевых баллонов с обмоткой из стекловолокна – порядка $3,0$ кг/СТДм³,
- цельнокомпозитных баллонов с обмоткой из стекловолокна – порядка $1,8$ кг/СТДм³,

- цельнокомпозитных баллонов с обмоткой из углеродного волокна – порядка 1,2 кг/СТДм³,
- алюминиевых баллонов с обмоткой из углеродного волокна – порядка 0,9 кг/СТДм³.

Благодаря использованию новых высокопрочных материалов удельный вес систем хранения КПГ удалось снизить почти в шесть раз. Однако стоимость лёгких баллонов для хранения КПГ возрастает примерно в той же степени.

Удельный вес систем хранения АПГ с учётом массы сосуда и адсорбента составляет порядка 5,7 кг/СТДм³.

Удельный вес систем хранения СПГ составляет порядка 0,56...0,91 кг/л.

Для сравнения, удельный вес бензобака составляет порядка 0,15...0,2 кг/л.

Теоретически вычисленные в работе [78] затраты энергии на сжатие ПГ от 0,1 МПа до 20 МПа составляют порядка 788 кДж/СТДм³, на заправку с адсорбцией ПГ до 3,5 МПа – от 450 до 600 кДж/СТДм³, на сжижение ПГ до –168⁰С – от 1560 до 3200 кДж/СТДм³. Конкретные значения затрат энергии на заправку АПГ и СПГ зависят от организации технологического процесса заправки и эффективности применяемого оборудования.

КПГ – компримированный природный газ

Природный газ, как и любой другой, может быть сжат при помощи компрессора. При этом занимаемый им объём значительно уменьшается. Природный газ традиционно сжимается до давления 20...25 МПа, что приводит к сокращению объёма в 200...250 раз.

К автомобильной газонаполнительной компрессорной станции (АГНКС) природный газ, как правило, подводят от магистрального газопровода, дожимают компрессором до 20 МПа и осушают его. На станции КПГ хранят в буферном баллоне высокого давления, из которого газ закачивают в баллоны автомобиля.

АПГ – адсорбированный природный газ

Для задачи аккумуляции ПГ (метана) наиболее подходящими являются микропористые адсорбционные материалы ввиду отсутствия у

молекул метана специфических взаимодействий, в частности электростатического взаимодействия, индуцированного дипольным или квадрупольным моментом. Вследствие этого адсорбция метана возможна лишь за счёт дисперсионных сил, возникающих в микропорах, обладающих высокими характеристическими энергиями. В настоящее время основными представителями таких адсорбентов являются микропористые углеродные адсорбенты, синтетические цеолиты и силикагели, которые производятся в промышленных масштабах и широко применяются в индустриях различных отраслей, а также перспективные микропористые материалы, синтезируемые в настоящее время в незначительных количествах: углеродные нанотрубки, фуллерены, а также MOF (металлорганические) и COF (ковалентные органические) структуры [78].

Природный газ адсорбируется в нанопористых структурах адсорбента. В случае активированного угля диаметр пор составляет от 12 до 35 ангстрем. Адсорбент должен обладать большой площадью контакта с метаном ($1200 \dots 2500 \text{ м}^2/\text{г}$) и содержать как можно меньше пустот. Более эффективными являются монолитные спрессованные адсорбенты с плотностью до $1,06 \text{ г}/\text{см}^3$ (рис. 36).

При использовании в качестве адсорбента активированного угля, АПГ при 3,5 МПа и 20°C имеет плотность хранения до $110 \text{ кг}/\text{м}^3$. При использовании в качестве адсорбента MOF-структур, АПГ при 3,5 МПа и 20°C имеет плотность хранения до $130 \text{ кг}/\text{м}^3$.

С увеличением давления хранения ПГ в сосуде эффективность адсорбционного концентрирования падает, и характеристики сжатого и адсорбированного природного газа сближаются. Как правило, давление в 3,5 МПа (35 бар) считается наиболее оптимальным для хранения АПГ.

Степень адсорбции метана на поверхности адсорбента зависит и от температуры (рис. 37). Снижение температуры с 20°C до -20°C позволяет снизить давление хранения примерно в 3 раза с сохранением того же количества газа. Данное обстоятельство позволяет говорить о возможности увеличения плотности хранения АПГ как за счёт применения новых, более эффективных адсорбентов, так и за счёт изменения условий хранения АПГ.

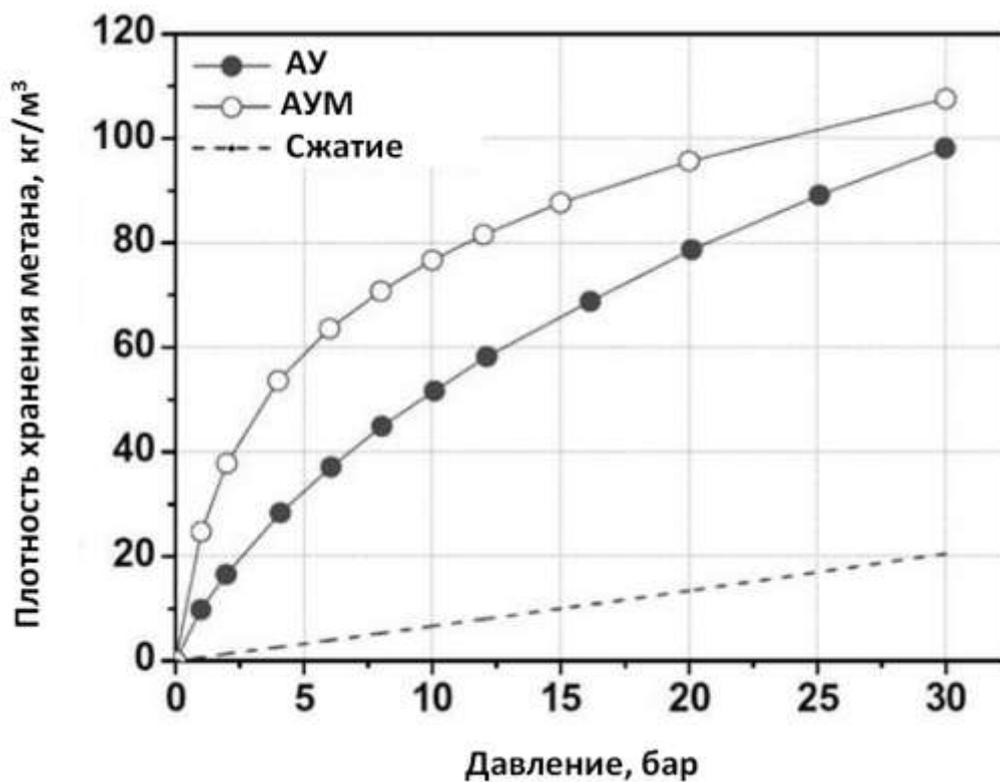


Рис. 36. Зависимость плотности хранения метана от давления в баллоне.
 АУ – активный уголь; АУМ – активный уголь монолитный [79]

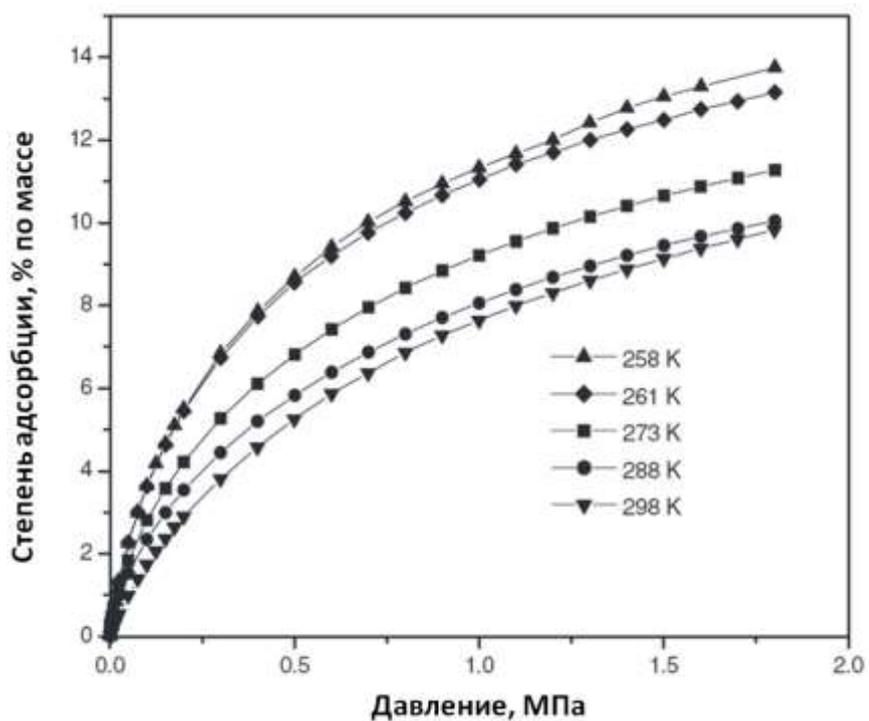


Рис. 37. Изотермы адсорбции метана (в масс. %) на активированном углеродном волокне ACF3 при различных температурах [80]

Основные технические проблемы реализации адсорбционных систем аккумулирования ПГ [78]:

- тепловые эффекты адсорбции и десорбции, понижающие эффективность и, соответственно конкурентоспособность адсорбционных систем;
- селективность адсорбции, которая приводит к неравномерному поглощению компонентов газовой смеси (природного газа), т.е. к накоплению «вредных» примесей в микропорах и снижению величины адсорбции метана (как основного и наиболее полезного компонента природного газа), особенно при циклической нагрузке.

В процессе адсорбции адсорбент способен значительно нагреваться (на 30...60°C). При повышении температуры адсорбционные свойства адсорбентов уменьшаются, т.е. выделяющаяся при адсорбции теплота уменьшает количество аккумулируемого газа, что препятствует процессу аккумулирования. Аналогично при десорбции поглощается примерно такое же количество теплоты, сколько и выделяется при адсорбции. Уменьшение температуры адсорбента вследствие поглощения теплоты затрудняет процесс «выдачи» адсорбентом аккумулированного газа. При низких температурах окружающей среды это также приводит к большому остаточному количеству ПГ в сосуде. Чтобы сократить количество остаточного газа целесообразно нагревать адсорбер при десорбции до температур от 50°C до 100°C или применять дополнительный вакуумный насос для откачки ПГ из сосуда [78].

Нагрев при адсорбции и охлаждение при десорбции можно ограничить, используя либо технические средства, например, теплообменник, помещённый внутрь адсорбера, либо с помощью самой организации данных процессов, например, увеличивая время заправки или изменяя расход ПГ.

Другой проблемой в реализации адсорбционных систем аккумулирования ПГ является **селективность адсорбции**. Применение неочищенного природного газа может существенно повлиять на работоспособность адсорбционных систем. Различные примеси в ПГ могут накапливаться и менять свою концентрацию в адсорбате в результате многочисленных заправок. Таким образом, при каждой последующей заправке адсорбционная система на природном газе всё

сильнее отклоняется от системы, работающей на «чистом» метане.

Данное обстоятельство указывает на целесообразность очистки ПГ (как минимум – от высококипящих углеводородов) и заправки адсорбционных систем очищенным метаном.

На эффективность работы АПГ-систем большое внимание оказывает не только режим хранения и эксплуатации, но и режим заправки и опорожнения сосуда (рис. 38). Выбор оптимального варианта зависит от многих разнородных факторов, что затрудняет принятие окончательного решения.

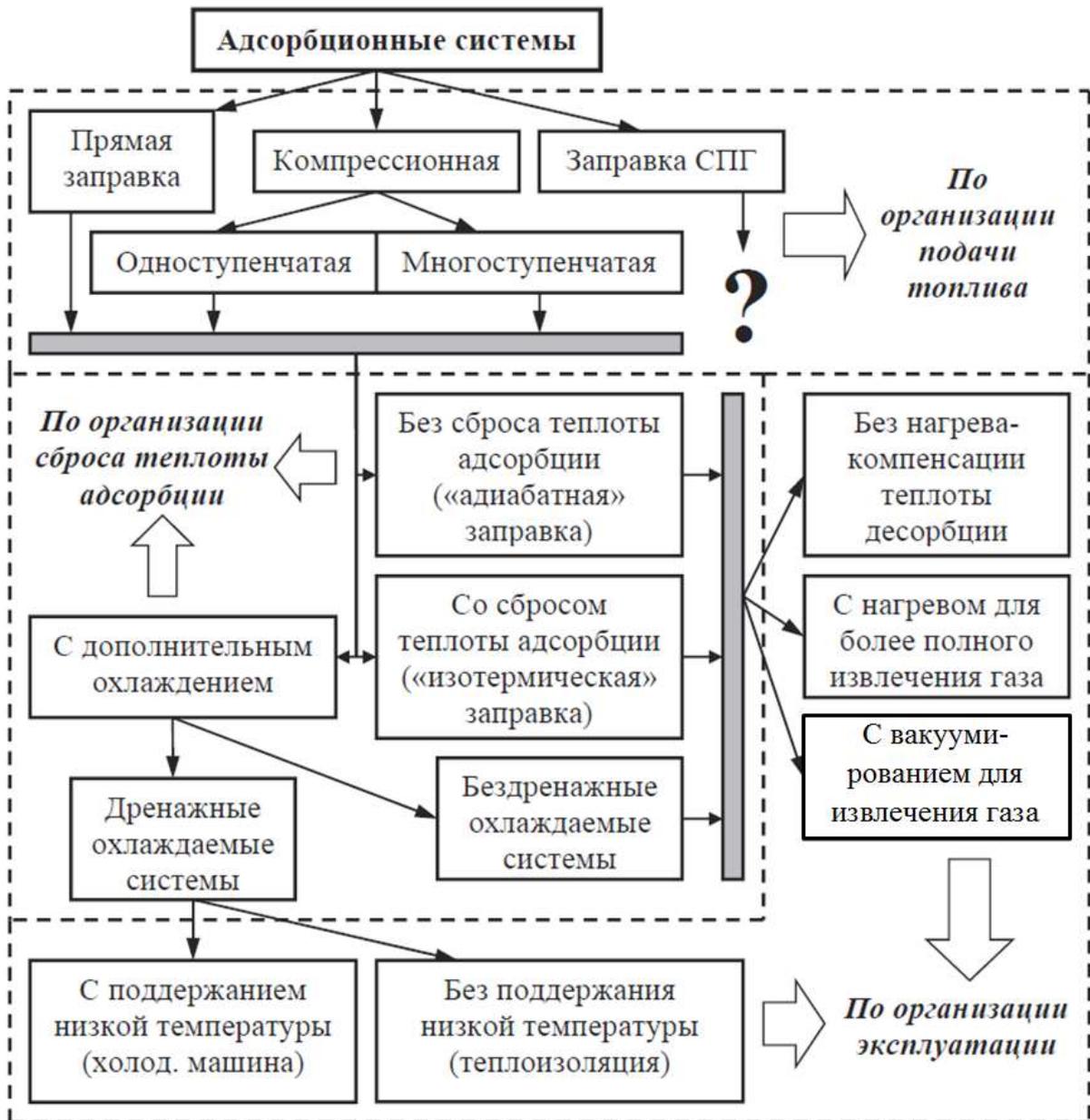


Рис. 38. Классификация заправки, хранения и эксплуатации АПГ-систем [78]

Тем не менее, использование АПГ в мире постепенно расширяется, что указывает на имеющийся потенциал данной системы хранения ПГ на борту автомобиля.

СПГ – сжиженный природный газ

СПГ получают из природного газа путём сжатия с последующим охлаждением. Процесс сжижения идет ступенями, на каждой из которых газ сжимается в 5...12 раз, затем охлаждается и передаётся на следующую ступень. Собственно сжижение происходит при охлаждении после последней стадии сжатия.

В процессе сжижения используются различные виды установок – дроссельные, турбодетандерные, турбинно-вихревые и пр.

Технология сжижения ПГ оказывает некоторое влияние на его состав. Во-первых, СПГ не одорируют, т.к. одорант при температурах хранения СПГ переходит в твёрдое состояние. Во-вторых, относительная доля метана в СПГ возрастает, т.к. некоторые фракции при сжижении удаляют (согласно [72], СПГ марки «А» должен содержать не менее 99% метана, марки «Б» – не менее 80% метана, а марки «В» – не менее 75% метана). Поэтому СПГ – более однородное и чистое топливо, чем КПГ.

Плотность СПГ примерно в 615 раз выше плотности ПГ при стандартных условиях. Требуется примерно 1,55 л СПГ для замены 1 л бензина и примерно 1,67 л СПГ для замены 1 л дизельного топлива [81].

Сжиженный ПГ хранится в термоизолированных сосудах при температуре $-160^{\circ}\text{C} \dots -125^{\circ}\text{C}$ и давлении 0,2...1,0 МПа. Несмотря на применяемые методы многослойной вакуумной термоизоляции, тепло окружающей среды постепенно проникает в сосуд и приводит либо к повышению давления в сосуде, либо к «выкипанию» некоторого количества ПГ, которое затем удаляется из сосуда при помощи клапана вентиляции. Время, которое сосуд может удерживать СПГ до необходимости сброса давления, называется **временем удержания**. Согласно нормативным требованиям, установленным в США и Канаде, время удержания для автомобильных сосудов СНГ составляет не менее 5 дней.

Поскольку СПГ представляет собой смесь газов, имеющих различную температуру кипения, то при «выкипании» и сбросе в атмосферу из бака удаляются более летучие компоненты (главным

образом метан), что приводит к постепенному изменению состава СПГ в сторону уменьшения доли метана. Этот процесс получил название «выветривание» (англ. *weathering*). Выветривание может негативно повлиять на работу ДВС. Поэтому к СПГ нужно относиться как к «скоропортящемуся» продукту. Автомобиль, работающий на СПГ, должен регулярно использоваться.

Чем больше доля метана в составе СПГ, тем в меньшей степени происходит «выветривание». Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке стандартов качества на СПГ.

СПГ в сосуде находится в состоянии насыщения, т.е. в состоянии равновесия жидкой и газообразной фаз. В этом состоянии отвод теплоты приводит не к снижению температуры, а к конденсации паров. Подвод теплоты, соответственно, приводит не к росту температуры, а к испарению жидкости. Состояние насыщения зависит от температуры и давления (рис. 39). С увеличением давления и температуры плотность паровой фазы увеличивается, а плотность жидкой фазы уменьшается. В критической точке¹ плотность метана составляет 162 кг/м³.

Обычно СПГ хранится на борту автомобилей при давлении 0,69 МПа (100 psi) и соответствующей температуре насыщения -129°C . Плотность жидкой фазы при этом составляет 373 кг/м³. Данные параметры выбраны, исходя из удобства использования такого давления в системе питания ДВС, хотя и являются компромиссными с точки зрения меньшей плотности СПГ.

При заправке СПГ подаётся в верхнюю часть ёмкости – в зону насыщенных паров. Охлаждение насыщенных паров приводит к их конденсации, так что давление при заправке не увеличивается. Ёмкость не заполняется до конца, остаётся некоторое пространство, позволяющее СПГ расширяться при подъёме температуры.

Для уменьшения эффекта «выветривания» метана подача топлива из ёмкости в систему питания ДВС осуществляется не из зоны паров, а из зоны жидкости (т.е. из нижней части ёмкости).

¹ В критической точке плотность жидкости и её насыщенного пара становятся равны, а поверхностное натяжение жидкости падает до нуля, поэтому исчезает граница раздела фаз жидкость-пар. При температуре выше критической газ невозможно сконденсировать ни при каком давлении.

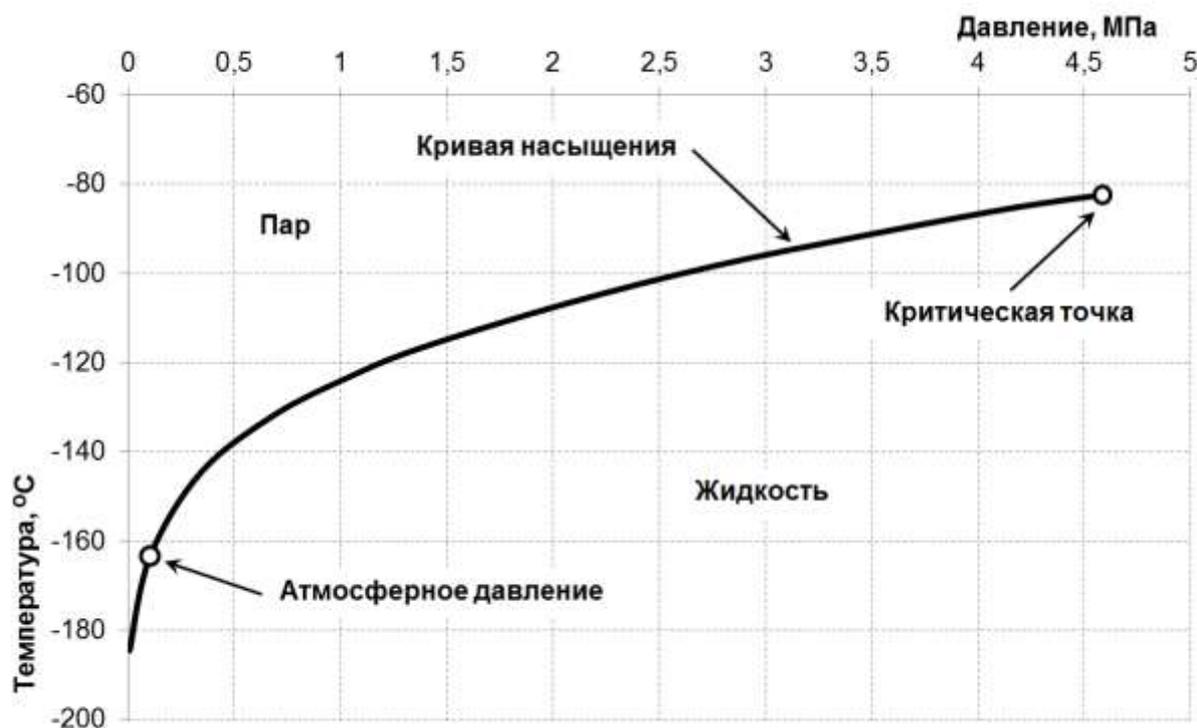


Рис. 39. Кривая насыщения для 100% метана определяет условия, при которых могут сосуществовать жидкая и паровая фазы [81]

Из СПГ можно легко получить КПГ, сжимая СПГ относительно небольшим насосом (примерно с баскетбольный мяч) до требуемого давления и затем испаряя его в теплообменнике. Этот процесс, называемый **регазификацией** СПГ, гораздо менее энергозатратен, чем процесс сжатия газообразного ПГ. В некоторых случаях такой вариант получения КПГ будет оптимальнее с точки зрения рассмотрения жизненного цикла или при условии эксплуатации смешанного парка автомобилей, работающих как на КПГ, так и на СПГ.

При этом, однако, следует учитывать разницу в содержании масла в КПГ, полученного традиционным сжатием в компрессорах, и КПГ, полученного из СПГ. При сжатии в компрессорах, КПГ захватывает с собой частички масла, используемого для смазки компрессора («унос» масла), а при получении КПГ из СПГ такого эффекта нет. В системах питания ДВС с впрыском ПГ через форсунки это может стать проблемой, т.к. подвижная игла форсунки требует смазки.

Таким образом, СПГ имеет наивысшую плотность хранения энергии из всех систем хранения ПГ на борту автомобилей. Это позволяет существенно увеличить запас хода автомобилей, работающих на СПГ, до величин, сопоставимых с запасом хода дизельных автомобилей.

Пропан-бутан (сжиженный углеводородный газ, СУГ)

Получение

СУГ представляет собой смесь пропана C_3H_8 и бутана C_4H_{10} , извлекаемую из конденсатных фракций природного газа, из попутных нефтяных газов, из газов, получаемых в процессах стабилизации нефти и газового конденсата, из нефтезаводских газов, получаемых с установок переработки нефти.

СУГ обычно рассматривается как побочный продукт переработки природного газа и нефти, т.е. невозобновляющихся источников энергии.

Свойства

Помимо пропана и бутана СУГ содержит по массе порядка 6% других углеводородов – этана, этилена, пропилена, бутилена и их изомеров, то есть состав СУГ неоднороден и непостоянен.

СУГ – смесь лёгких углеводородов, которые, будучи газами при нормальных условиях, легко сжижаются при умеренном повышении давления или при снижении температуры. У пропана критическая температура – $96,8^{\circ}C$, у бутана – $152,0^{\circ}C$, что позволяет легко сжижать эти газы и хранить в жидком состоянии при относительно невысоком давлении 0,34...1,6 МПа.

В России установлены две марки СУГ автотранспортного применения [82]: ПА – пропан автомобильный и ПБА – пропан-бутан автомобильный¹. ПА используется в зимнее время, а ПБА – в летнее.

По физико-химическим и эксплуатационным показателям СУГ должны соответствовать требованиям и нормам, указанным в табл. 11.

¹ В международной практике используется название «Autogas».

Таблица 11

Физико-химические и эксплуатационные показатели сжиженных
углеводородных газов

Наименование показателя	Норма для марки		Метод испытания
	ПА	ПБА	
1. Массовая доля компонентов, %: - пропана - сумма непредельных углеводородов, не более	85±10 6	50±10 6	По ГОСТ 10679
2. Объёмная доля жидкого остатка при 20 °С, %, не более	0,7	1,6	По ГОСТ Р 52087-2003
3. Давление насыщенных паров, избыточное, МПа, при температуре: плюс 45 °С, не более минус 20 °С, не менее минус 30 °С, не менее	- - 0,07	1,6 0,07 -	По ГОСТ Р 50994 или ГОСТ 28656
4. Массовая доля сероводорода и меркаптановой серы, %, не более, в том числе сероводорода, не более	0,01 0,003		По ГОСТ 229S5 или ГОСТ Р 50802
5. Содержание свободной воды и щёлочи	Отсутствие		По ГОСТ Р 52087-2003

СУГ не имеет запаха, и поэтому в целях безопасности его одорируют тиолами.

СУГ образуют с воздухом взрывоопасные смеси при концентрации паров пропана от 2,3% до 9,5%, нормального бутана от 1,8% до 9,1% (по объёму), при давлении 0,1013 МПа и температуре 15°С...20°С.

Пропан-бутан тяжелее воздуха в 1,5...2 раза и при утечке скапливается у земли, создавая взрывоопасные условия. Поэтому газобаллонные автомобили хранят на открытых стоянках, а ремонтные зоны оснащают хорошей вентиляцией.

Температура самовоспламенения пропана в воздухе составляет 470°С, нормального бутана – 405°С.

Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны (в пересчете на углерод) предельных углеводородов (пропан, нормальный бутан) – 300 мг/м³, непредельных углеводородов (пропилен, бутилен) – 100 мг/м³.

Сжиженные газы, попадая на тело человека, вызывают обморожение, напоминая ожог. Пары сжиженного газа тяжелее воздуха и могут скапливаться в низких непрветриваемых местах.

Человек, находящийся в атмосфере с незначительным превышением ПДК паров сжиженного газа в воздухе, испытывает кислородное голодание, а при значительных концентрациях в воздухе может погибнуть от удушья.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Особенности использования СУГ в качестве автомобильного топлива аналогичны особенностям использования ПГ, но в несколько меньшей степени. Так же, как и ПГ, СУГ используется в двухтопливных и монотопливных ДВС. **Монотопливные** оригинальные (т.е. специально спроектированные и собранные на заводе) модели автомобилей-такси и лёгких коммерческих грузовиков популярны в Корее, Китае и Японии. **Двухтопливный** вариант на основе ретрофита (переоборудования) базового бензинового ДВС более распространён в Европе и Америке.

В настоящее время существует четыре принципиально различных типов систем питания двигателей, работающих на СУГ:

- система с испарителем и одноточечным (центральным) смесителем Вентури, в котором производится смешение воздуха и газообразного топлива;
- система с испарителем и многоточечной (распределённой) подачей топлива в газообразном виде (англ. *vapor phase injection, VPI*);
- система с многоточечным (распределённым) впрыском топлива в сжиженном виде во впускной трубопровод непосредственно перед впускным клапаном (англ. *liquid phase injection, LPI*);
- система с многоточечным (распределённым) впрыском топлива в сжиженном виде непосредственно в цилиндр (англ. *liquid phase direct injection, LPDI*).

Одним из недостатков, присущих системам с центральным смесителем, являлась проблема «обратных вспышек». «Обратная вспышка» представляет собой самопроизвольное воспламенение рабочей смеси во впускном коллекторе на такте впуска, происходящее

или от тепла остаточных газов и перегретых выпускных клапанов (что обусловлено низкой скоростью сгорания СУГ), или при сбоях в системе зажигания.

В системах питания VPI и LPI с многоточечным распределением топлива форсунки расположены в непосредственной близости от впускных клапанов, а подача (впрыск) топлива осуществляется только в моменты открытия впускных клапанов, что практически исключает вероятность возникновения «обратных вспышек». При этом также увеличены точность дозирования топлива, стабильность, быстродействие и долговечность системы.

В системах питания LPI с многоточечным впрыском жидкого пропан-бутанового топлива происходит существенное охлаждение рабочей смеси при регазификации СУГ. Это увеличивает плотность и, соответственно, массу заряда, поступающего в цилиндр, что позволяет повысить мощность ДВС. Однако это может привести к проблемам при запуске холодного двигателя, особенно при низких температурах окружающего воздуха. Поэтому при низкой температуре двигатель пускают на бензине, а после его прогрева водитель переключает систему питания на СУГ.

В системах питания LPDI впрыск жидкого пропан-бутанового топлива осуществляется непосредственно в цилиндр двигателя на такте сжатия с использованием штатных бензиновых форсунок и топливного насоса. Охлаждение рабочей смеси позволяет улучшить мощностные, экономические и экологические характеристики ДВС.

При низких температурах окружающего воздуха выбросы бензинового ДВС при холодном пуске значительно выше, чем газового. Это вызвано необходимостью обогащения смеси для обеспечения устойчивого пуска, а также длительным периодом прогрева нейтрализатора. Бензин обладает худшей испаряемостью, поэтому смесь необходимо обогащать. Это приводит к росту выбросов CO и CH, снизить которые нейтрализатор не способен из-за низкой температуры.

В случае использования СНГ в качестве топлива проблем с испаряемостью не возникает. Как только давление СНГ падает, он немедленно испаряется, поэтому состав смеси остаётся постоянным как при низких, так и при высоких температурах.

Расход СУГ на 10...15% выше, чем бензина, из-за меньшей объёмной теплотворности: 1 л бензина будет эквивалентен 1,1...1,15 л СУГ, а в условиях двутопливной модификации системы питания из-за падения мощности двигателя – 1,15...1,3 л СУГ.

Выбросы CO_2 при использовании СУГ снижаются примерно на 15% по сравнению с бензином. При сжигании одного литра бензина образуется около 2,35 кг CO_2 , тогда как при сжигании СУГ – 1,64 кг CO_2 . С учётом меньшей плотности СУГ 1 л бензина эквивалентен 1,33 л СУГ. С учётом этого при сжигании эквивалентного количества СУГ выбросы CO_2 составят примерно 2 кг. Результаты оценки жизненного цикла показывают, что автомобили, работающие на СУГ, выбрасывают примерно на 20% меньше CO_2 , чем бензиновые и примерно столько же, сколько дизельные аналоги [83].

Выбросы основных нормируемых ЗВ с ОГ ДВС, работающих на СУГ, могут быть как меньше, так и больше бензиновых аналогов. Это зависит от типа системы питания (монотопливная/двухтопливная), качества применяемого газобаллонного оборудования и типа его установки на автомобиле (оригинальный/ретрофит). Оригинальные монотопливные модели, как правило, превосходят бензиновые аналоги по экологичности как с позиции выбросов ЗВ, так и с позиции создаваемого шума.

В работе [84] приводятся сравнительные данные по уровню выбросов различных автомобилей, работающих на СУГ и традиционных видах топлива. Отмечается, что легковые автомобили уровня Евро-5, работающие на СУГ, выбрасывают NO_x примерно в два раза меньше, чем бензиновые аналоги и примерно в 10 раз меньше, чем дизельные. Выбросы ДЧ примерно на 15% меньше, чем у бензиновых аналогов и примерно на 10% меньше, чем у дизельных. Выбросы СН примерно на 30% меньше, чем у бензиновых аналогов и примерно вдвое больше, чем у дизельных. Выбросы СО примерно на 20% больше, чем у бензиновых аналогов и примерно в 4 раза больше, чем у дизельных.

В работе [85] отмечается, что уровень выбросов таких ненормируемых ЗВ, как бензол, ацетальдегид, формальдегид и 1,3-бутадиен, у автомобилей, работающих на СУГ, также ниже бензиновых и дизельных аналогов.

Ещё одним преимуществом газобаллонных автомобилей, работающих на СУГ, является практически полное отсутствие выбросов углеводородов из системы питания, т.к. она полностью герметична.

Оксигенаты и биооксигенаты

Оксигенатами называют кислородсодержащие соединения. Оксигенаты могут использоваться в качестве добавок к бензину (спирты: метанол, этанол, трет-бутанол и эфиры: метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ), этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ), диизопропиловый эфир (ДИПЭ), трет-амил-метиловый эфир (ТАМЭ) и др.) или в качестве самостоятельных топлив (метанол, этанол, бутанол).

Сырьём для их производства могут служить ископаемые топлива (нефть, газ, уголь), либо биологическая продукция (сахарный тростник, зерновые, сахарная свёкла и т.д., а также целлюлоза).

В случае использования в качестве первичного сырья биопродукции говорят о биооксигенатах, чтобы подчеркнуть возобновляемость и потенциально низкий «углеродный след» таких топлив.

Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ)

Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) — один из представителей простых эфиров. МТБЭ представляет собой прозрачную бесцветную жидкость с характерным эфирным запахом.

Получение

МТБЭ получают в реакции присоединения метанола к изобутилену. При этом не требуется ни высоких температур, ни высоких давлений. Реакцию осуществляют на специальном катализаторе (чаще всего это ионообменные смолы) с высокой селективностью и почти полной конверсией за проход.

В качестве первичного сырья для производства МТБЭ используется нефть или природный газ. В последнее время начали использоваться технологии получения МТБЭ из биологического сырья – биометанола, который, в свою очередь, производят из синтез-газа¹, получаемого при

¹ Синтез-газ – смесь, состоящая преимущественно из СО и Н₂.

паровой конверсии биометана.

Процесс производства МТБЭ является экологически чистым и практически безотходным. Отработанный катализатор подвергается регенерации и повторно используется в производстве МТБЭ. Количество сточных вод незначительно (2...5 кг на 1 т эфира), и они пригодны для подачи на биологические очистные сооружения без какой-либо локальной очистки.

В настоящее время потребление МТБЭ в Европе и США сокращается (с темпами порядка 1% в год) по причине реализации политики перехода на биотоплива. Основным инструментом, применяемым в данном случае, являются налоговые льготы, предоставляемые производителям ЭТБЭ и этанола. В Европе, кроме того, из экологических соображений проводится политика постепенного перехода от бензина к дизельному топливу, что в свою очередь также является фактором, обуславливающим тенденцию снижения спроса на МТБЭ в Европе.

Несмотря на прогнозируемое снижение мирового спроса, специалисты ожидают роста спроса на МТБЭ в странах Азии, Среднего Востока, Восточной Европы и Индии.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

МТБЭ применяется в качестве добавки к моторным топливам, повышающей октановое число бензинов (антидетонатор). При добавлении 10% МТБЭ октановое число полученного бензина повышается на 2,1...5,8 единиц (по исследовательскому методу) в зависимости от углеводородного состава исходного сырья. Предельное содержание МТБЭ ограничено 15%, т.к. эта присадка имеет низкую теплоту сгорания, что снижает мощность двигателя. Кроме того, эфиры в большой концентрации становятся коррозионноактивными, и такое топливо начинает разъедать резину и пластмассы.

Давление насыщенных паров у эфиров ниже, чем у спиртов, что более благоприятно для формирования эксплуатационных характеристик бензинов. Кроме того, эфиры в отличие от спиртов не оказывают

азеотропного эффекта¹ на кривую перегонки товарного бензина, что позволяет точно предвидеть последствия их добавления в бензин.

Топливная экономичность и мощностные показатели двигателя при работе на бензинах с 15% МТБЭ находятся на уровне товарного бензина. Токсичность отработавших газов при этом несколько снижается, в основном за счёт уменьшения выбросов СО (на 30...50%), СН (на ≈13%) и NO_x (на ≈8%). По данным Агентства по охране окружающей среды (US EPA), применение оксигенатов в топливах позволило уменьшить концентрацию СО в атмосферном воздухе городов, где реализовались программы использования подобных топлив, в среднем на 14% [86]. Кроме того, US EPA отмечает, что использование оксигенатов позволило сократить выбросы твёрдых частиц на 25...30%, а также привело к сокращению формирования приземного озона – одного из компонентов фотохимического смога [87].

Изменений и нарушений в состоянии и работе систем двигателя при использовании бензинов с МТБЭ не наблюдается.

При добавлении к бензинам МТБЭ растворимость воды в бензине возрастает незначительно. При хранении бензинов с МТБЭ их низкотемпературные свойства практически не ухудшаются – их температура помутнения не превышает –50°С. Гарантийный срок хранения МТБЭ – 1 год со дня изготовления.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

МТБЭ действует угнетающе на центральную нервную систему. Действие обратимое. Через неповрежденную кожу практически не проникает. Местное действие на кожу – лёгкое раздражающее. Попадание в глаза жидкого продукта вызывает лёгкое раздражение конъюнктивы, на роговицу не действует. В организме не накапливается.

Метил-трет-бутиловый эфир при попадании в окружающую среду способен оказывать отравляющее действие на биологические объекты.

МТБЭ хуже связывается почвой (адсорбируется), чем другие компоненты бензина, поэтому распространяется быстрее и на большие

¹ Азеотропная смесь — смесь двух или более жидкостей, которые при данном давлении не могут быть разделены перегонкой.

расстояния, чем бензин. Кроме того, МТБЭ меньше подвержен биodeградации, чем бензин. Некоторые исследования подземных вод показывают, что концентрация МТБЭ сохраняется практически неизменной в течение нескольких лет. Именно неприятный запах и вкус питьевой воды явился одной из причин запрета МТБЭ в США. Напротив, исследования поверхностных водоёмов показывают, что МТБЭ, из-за своей высокой летучести, достаточно быстро удалятся из воды [88].

Согласно мнению исследователей из США, которые изучали эффекты, связанные с применением бензина с присадкой оксигенатов, МТБЭ не рассматривается как вещество, способное причинить серьёзный вред населению, однако отмечается, что данных, описывающих возможные негативные эффекты потребления МТБЭ с питьевой водой накоплено ещё не достаточно.

При попадании в организм человека высоких доз МТБЭ отмечались (в США) случаи возникновения канцерогенных заболеваний. Однако Международное агентство по исследованию раковых заболеваний в 1998 году пришло к выводу, что «нет доказательств, подтверждающих канцерогенный риск МТБЭ для человека» [89]. В ноябре 2000 г. Рабочая группа по классификации и маркировке опасных веществ Европейского союза пришла к выводу об отсутствии у МТБЭ канцерогенных, мутагенных и тератогенных свойств.

В рекомендациях Агентства по защите окружающей среды США (EPA US) указывается, что «существует вероятность того, что МТБЭ не вызывает неблагоприятных последствий для человека (неприятный «скипидарный» вкус и запах питьевой воды) при концентрациях ниже 20...40 млрд⁻¹». При этом токсическое действие МТБЭ на человека проявляется при концентрациях в 20000...100000 раз более высоких. В этом смысле, наличие сильного запаха и привкуса МТБЭ можно считать гарантией своевременного обнаружения этого загрязнителя в воде и отказе от её употребления.

В настоящее время US EPA включило МТБЭ в список приоритетных загрязняющих веществ, для которых ведутся работы по установлению предельно допустимых норм. Большинство крупных источников централизованного водоснабжения оборудованы системами мониторинга МТБЭ в воде [90].

В 2002 году опубликован финальный отчёт по оценке риска использования МТБЭ в Европейском Союзе, выполненный Институтом по защите здоровья и прав потребителей под эгидой Европейского химического бюро [91]. Отмечается, что необходимо разработать мероприятия по снижению существующего уровня риска для водных экосистем и подземных вод. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования влияния МТБЭ на водных обитателей – гидробионтов. Население не подвергается чрезмерному риску токсического воздействия МТБЭ, однако рабочие автопредприятий и автосервисов, часто контактирующие с МТБЭ, должны быть дополнительно защищены от воздействия этого вещества на кожу. Общий риск населения связан с изменением вкуса и запаха загрязнённой МТБЭ питьевой воды. Здесь также требуется разработка дополнительных мероприятий.

Основываясь на физико-химических свойствах МТБЭ, предполагается следующее распределение данного вещества в компонентах окружающей среды:

- атмосфера – 93,9%;
- гидросфера – 6,045%;
- почва – 0,054%;
- донные осадки – 0,001%.

Данное распределение получено для 20°C. При более низких температурах, вследствие увеличения растворимости МТБЭ в воде и уменьшения давления насыщенных паров, доля содержания МТБЭ в воде увеличится, а доля содержания МТБЭ в воздухе уменьшится.

Этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ)

Этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ) – бесцветная или бледно-жёлтая, прозрачная, подвижная, легковоспламеняющаяся жидкость с эфирным запахом.

Получение

Синтез ЭТБЭ осуществляется из этанола (47% об.) и изобутилена (53% об.) в присутствии кислотных катализаторов при температуре 40...90°C. Этиловый спирт производится из биологического сырья, а изобутилен – из нефти или газа.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

По своим свойствам ЭТБЭ практически идентичен МТБЭ, поэтому введение этого вещества в состав бензина приводит к аналогичным последствиям. ЭТБЭ имеет несколько лучшие октановые характеристики, имеет более высокую температуру кипения (т.е. низкое давление паров), и его максимально-допустимое содержание в бензине больше.

В бюллетене фирмы Дюпон (Dupont) «Предотвращение утечек реформулированного топлива и оксигенатов», опубликованного в 1992 году, отмечается, что ЭТБЭ «обладает наименьшей из всех эфиров агрессивностью по отношению к эластомерам».

Хотя ЭТБЭ имеет низкую растворимость в воде, рекомендуется предохранять его от влаги, т.к. чистый ЭТБЭ может растворить в себе до 5% воды. Кроме того, в отличие от МТБЭ, ЭТБЭ реагируя с окислителями (например, с кислородом воздуха), может образовывать пероксиды. Эта реакция в нормальных условиях протекает медленно, однако заметно ускоряется под воздействием ультрафиолетового облучения. Пероксиды в составе ЭТБЭ даже в малых концентрациях резко уменьшают его октановое число. Высокие концентрации пероксидов приводят к образованию смолистых отложений и коррозионно активных кислот. Кроме того, пероксиды взрывоопасны. Поэтому при хранении чистого ЭТБЭ в него добавляют антиоксидант, например, фенилендиамин. Хранение бензинов, содержащих ЭТБЭ, однако, не требует введения дополнительных антиоксидантов.

Основной минус – стоимость этанола, как сырья. Цена этанола почти в три раза выше, чем у метанола. Следовательно, и стоимость ЭТБЭ будет значительно выше, чем стоимость МТБЭ. Без государственных дотаций для производителей бензина ЭТБЭ будет, по-видимому, не интересен.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

ЭТБЭ является веществом, угнетающе действующим на центральную нервную систему, действие обратимое. ЭТБЭ не относится к канцерогенным, мутагенным и тератогенным веществам. ЭТБЭ не накапливается в организмах. Исследования воздействия высоких доз

ЭТБЭ на животных показали возможность заболеваний желудочно-кишечного тракта и почек, однако эти последствия полагают маловероятными для человека.

В 2005 году опубликован предварительный отчёт по оценке риска использования ЭТБЭ в Европейском Союзе, выполненный Институтом по защите здоровья и прав потребителей под эгидой Европейского химического бюро. В нём указывается на эквивалентность риска использования ЭТБЭ и МТБЭ.

ЭТБЭ может быть токсичным для морских беспозвоночных. В анаэробных условиях биодеградация ЭТБЭ практически не протекает. В присутствии специфических аэробных бактерий ЭТБЭ быстро биодegradирует. В почве и донных осадках не накапливается. Благодаря своей высокой летучести, ЭТБЭ при утечках, главным образом, загрязняет атмосферу, откуда может вымываться дождями и попадать в грунтовые воды. Время полураспада (англ. *half-life*) ЭТБЭ в воздухе составляет около 2 дней.

Трет-амил-метиловый эфир (ТАМЭ)

Трет-амил-метиловый эфир (ТАМЭ) – прозрачная, бесцветная, летучая жидкость с эфирным запахом. Легко воспламеняется, бурно реагирует с окислителями и сильными кислотами.

Получение

Производят ТАМЭ на нефтеперерабатывающих заводах путём взаимодействия одного из двух C_5 олефинов (2-этил-2-бутен или 2-метил-1-бутен) с метанолом в присутствии катализатора из ионообменной смолы. Только небольшая часть (около 3%) производимого в Евросоюзе ТАМЭ имеет высокую чистоту (96%), в основном же выпускается смесь, содержащая 10...30% ТАМЭ и 70...90% различных углеводородов.

Серьёзное внимание к ТАМЭ в качестве присадки к топливу начали уделять в начале 1990-х. Причины – чисто технологические. Потенциал по производству ТАМЭ по объёму равен производству МТБЭ [92].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

ТАМЭ используется в качестве высокооктанового компонента автомобильных бензинов, аналогично МТБЭ. Однако в отличие от МТБЭ, эфир ТАМЭ имеет более низкое давление насыщенных паров и большую теплоту сгорания, что весьма важно с точки зрения эксплуатационных свойств топлива.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

ТАМЭ – вредное вещество, способное вызывать сонливость и головокружение.

В 2006 году опубликован отчёт по оценке риска использования ТАМЭ в Европейском Союзе, выполненный Институтом по защите здоровья и прав потребителей под эгидой Европейского химического бюро [93]. В нём указывается на эквивалентность риска использования ТАМЭ и МТБЭ.

Среднее время полураспада ТАМЭ в атмосфере – 2,9 суток. Способность ТАМЭ к биодegradации практически такая же, как и у МТБЭ и несколько худшая, чем у ЭТБЭ. ТАМЭ не накапливается в организмах (не биоаккумулируется) и не передаётся по пищевым цепям (не биоконцентрируется).

Основываясь на физико-химических свойствах ТАМЭ, предполагается следующее распределение данного вещества в компонентах окружающей среды:

- атмосфера – 95,7%;
- гидросфера – 4,264%;
- почва – 0,038%;
- донные осадки – 0,0008%.

Данное распределение получено для 20°C. При более низких температурах, вследствие увеличения растворимости ТАМЭ в воде и уменьшения давления насыщенных паров, доля содержания ТАМЭ в воде увеличится, а доля содержания ТАМЭ в воздухе – уменьшится.

Диизопропиловый эфир (ДИПЭ)

Эфир диизопропиловый (ДИПЭ) – простой алифатический эфир, бесцветная жидкость с характерным эфирным запахом. Смешивается с органическими растворителями.

Получение

ДИПЭ получают непосредственно из пропилена и воды в присутствии серной кислоты или дегидратацией изопропилового спирта серной кислотой.

ДИПЭ – побочная фракция при производстве изопропилового спирта.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

ДИПЭ применяют в качестве компонента моторного топлива для повышения его октанового числа.

По своим свойствам ДИПЭ практически идентичен МТБЭ, поэтому введение этого вещества в состав бензина приводит к аналогичным последствиям. Однако при содержании в бензине 17% ДИПЭ увеличение массового расхода топлива из-за снижения теплоты сгорания уже не компенсируется улучшением экономичности из-за обеднения смеси и отмечается некоторое увеличение удельного расхода топлива [94].

ДИПЭ при контакте с воздухом образует пероксиды легче, чем ЭТБЭ. Поэтому при хранении чистого ДИПЭ добавляют антиокислители и чаще контролируют содержание пероксидов (рекомендуется 1 раз в три месяца, в то время как для ЭТБЭ эта рекомендация составляет 1 раз в 12 месяцев), т.к. они не только снижают октановое число ДИПЭ, но и могут образовывать взрывоопасные смеси. Склонность ДИПЭ к образованию гидроперекисей является его недостатком. Гарантийный срок хранения – 4 месяца со дня изготовления продукта.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

При вдыхании паров ДИПЭ вызывает кашель, сонливость, головокружение, боли в горле.

При попадании на кожу вызывает покраснение, сухость и

растрескивание. Повторный или длительный контакт с кожей может вызвать дерматит. При попадании в глаза вызывает покраснение.

Метанол

Метанол (метиловый спирт) – простейший одноатомный спирт, бесцветная ядовитая жидкость.

Метанол смешивается в любых соотношениях с водой, образуя азеотропную смесь¹ и с большинством органических растворителей.

Получение

Современный промышленный метод получения – каталитический синтез из CO и H₂ при температуре 250°C, давлении 7 МПа в присутствии катализатора из смеси оксида цинка ZnO и оксида меди II CuO.

В настоящее время метан (природный газ или биогаз) рассматривается как наиболее экономически и экологически приемлемое сырьё для производства метанола. Однако при этом 43% энергии, заключённой в метане, теряется в процессе производства метанола. Для сравнения, использование метана напрямую в виде моторного топлива (КПГ) гораздо более эффективно: потери энергии на добычу, транспортировку и сжатие составляют только порядка 16%.

В начале 1980-х рядом европейских стран совместно разрабатывался проект, ориентированный на создание промышленных систем по производству биометанола с использованием прибрежных пустынных районов. Первичное производство биомассы осуществлялось путём культивирования фитопланктона в искусственных водоёмах, создаваемых на морском побережье или территориях, непригодных для выращивания сельхозпродукции. Вторичные процессы представляли собой метановое брожение биомассы и последующее гидроксигирование метана с получением метанола.

Основными доводами в пользу использования водорослей являются следующие:

- высокая продуктивность фитопланктона (до 100 т/га в год);

¹ Однородная жидкая смесь, которая при перегонке не разделяется на фракции.

- в производстве не используются ни плодородные почвы, ни пресная вода;
- процесс не конкурирует с сельскохозяйственным производством;
- коэффициент энергоотдачи процесса достигает 14 на стадии получения метана и 7 на стадии получения метанола.

Осуществлению этого проекта помешало общемировое снижение цен на нефть.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Метанол можно рассматривать либо в качестве высокооктанового компонента автомобильных бензинов, либо в качестве самостоятельного топлива.

Оптимальная добавка метанола в бензино-метанольные смеси — от 5% до 20%; при таких концентрациях бензино-спиртовая смесь характеризуется удовлетворительными эксплуатационными свойствами. Добавка метанола к бензину снижает теплоту сгорания топлива. В то же время, за счёт того, что для сжигания метанола требуется вдвое меньше кислорода, теплотворные способности метанола-воздушных и бензо-воздушных смесей различаются незначительно, поэтому применение метанола в качестве топлива не уменьшает мощностные показатели двигателя, но требует перерегулировки топливоподающей системы в сторону увеличения цикловой подачи топлива [95].

Вследствие изменения стехиометрических характеристик, использование 15% добавки метанола (смесь М15) в стандартной системе питания ведет к обеднению топливовоздушной смеси примерно на 7%. В то же время, при введении метанола повышается октановое число топлива (в среднем на 3...8 единиц для 15%-ной добавки), что позволяет компенсировать ухудшение энергетических показателей за счёт повышения степени сжатия. Одновременно метанол улучшает процесс сгорания топлива благодаря образованию радикалов, активизирующих цепные реакции окисления. Исследования горения бензино-метанольных смесей в одноцилиндровых двигателях со стандартной и послойной системами смесеобразования показали, что добавка метанола сокращает период задержки воспламенения и продолжительность сгорания топлива. При этом теплоотвод из зоны

реакции снижается, а предел обеднения смеси расширяется и становится максимальным для чистого метанола. Это приводит к увеличению эффективного КПД двигателя и его мощности, однако топливная экономичность при этом ухудшается.

Более низкая энергоёмкость метанола (1 литр метанола эквивалентен примерно 0,57 литра бензина) влечет за собой увеличение его расхода по сравнению с бензином, и, соответственно, требуется увеличение ёмкости топливного бака для сохранения запаса хода автомобиля.

Низкая энергоёмкость метанола в некоторой степени компенсируется высокой внутренней теплотой парообразования, что позволяет увеличить на 10...15% коэффициент наполнения двигателя за счет охлаждения потока воздуха при испарении метанола.

При использовании спиртовых топлив (в чистом виде или в смеси с бензином) снижается содержание контролируемых ЗВ в ОГ автомобиля. Низкий молекулярный вес метанола вместе с высоким содержанием в нём кислорода и возможность значительного обеднения смеси способствуют уменьшению образования токсичных продуктов неполного сгорания CO и CH, а также смолистых отложений во впускной системе и нагарообразования в камерах сгорания двигателя. Благодаря низким температурам горения спиртов выделяется значительно меньше NO_x. Выбросы канцерогенных ароматических углеводородов также на порядок ниже, чем при работе двигателя на бензине.

Наряду с положительной экологической эффективностью использования спиртовых топлив следует отметить и такие негативные явления, как повышенные выбросы альдегидов и испарения углеводородных соединений. Содержание альдегидов растёт с увеличением концентрации спиртов в топливной смеси. Для метанола характерны выбросы формальдегида, в то время как при сгорании этанола образуется преимущественно ацетальдегид. Минимальные выбросы альдегидов соответствуют стехиометрическому составу топливной смеси и возрастают при её обеднении или обогащении. В среднем выбросы альдегидов при работе на спиртах примерно в 2...4 раза выше, чем при работе двигателя на бензине.

Низкое давление насыщенных паров и высокая теплота испарения

спиртов делают практически невозможным запуск ДВСПВ уже при температурах ниже -5°C ... -10°C . Для обеспечения надёжного запуска двигателя при высоком содержании метанола в топливной смеси и пониженных температурах окружающего воздуха используют электроподогрев воздуха или топливовоздушной смеси, частичную рециркуляцию горячих отработавших газов, добавки к топливу летучих компонентов и другие меры.

Одной из наиболее серьёзных проблем, затрудняющих применение добавок метанола, является низкая стабильность бензино-метанольных смесей и особенно чувствительность их к воде. Различие плотности бензина и метанола и высокая растворимость последнего в воде приводят к тому, что попадание даже небольших количеств воды в смесь ведет к её немедленному расслоению и осаждению водно-метанольной фазы. Склонность к расслоению усиливается с понижением температуры, увеличением концентрации воды и уменьшением содержания ароматических соединений в бензине. Начальной стадией такого расслоения является помутнение бензина. Поэтому длительное хранение метанольных бензинов, всегда сопровождающееся увеличением содержания воды, нецелесообразно.

Под действием метанола быстро разрушается сталь, алюминий, цинк, свинец, магний и сплавы на их основе. Установлено, что при работе двигателя на метаноле значительно усиливается коррозионный износ деталей цилиндра-поршневой группы и механизма газораспределения при низких температурах охлаждающей жидкости и моторного масла (ниже 65°C). На прогретом двигателе коррозионный износ уменьшается, но полностью не устраняется.

Длительный контакт с метанолом вызывает набухание и разрушение ряда эластомеров, применяемых в качестве прокладок.

Коррозионная активность бензино-метанольных смесей значительно ниже, чем у чистого метанола, однако в ряде случаев существенна и сильно зависит от присутствия воды. Например, в смесях с содержанием 10...15% метанола сталь, латунь и медь не корродируют, алюминий же корродирует медленно с изменением цвета.

Проблема коррозионной агрессивности метанола требует замены нестойких материалов, разработки и применения устройств для

ускоренного прогрева двигателя после пуска, а также специальных типов моторных масел. Вместе с тем острота этой проблемы может быть в значительной степени уменьшена подачей в двигатель не жидкого, а испаренного метанола. При предварительном испарении метанола уменьшается его коррозионная активность и коррозионный износ двигателя становится в 2...3 раза меньше, чем на жидком метаноле.

В настоящее время чистый 100% метанол (M100) может использоваться в специальных двигателях, например, для гоночных автомобилей, т.к. обладает очень высоким октановым числом, что позволяет использовать очень высокую степень сжатия и получать значительно больше энергии, чем от бензина. Метанол не может быть использован в обычных ДВСПВ в количестве, превышающем 5% по массе. Большее количество метанола в смеси можно использовать только совместно со специальными присадками-растворителями, а также при определённой модернизации двигателя. Наиболее распространённая коммерческая марка такого топлива в США называется M85, т.е. в нём содержится 85% метанола и 15% неэтилированного бензина.

Бензино-метанольные смеси различного состава могут использоваться в «гибкотопливных» (англ. *flexible-fuelled*) автомобилях, способных определять соотношение «метанол/бензин» в смеси, поступающей к двигателю. Это необходимо для того, чтобы система управления двигателем могла настроить воздушно-топливное соотношение и опережение зажигания в зависимости от количества добавленного в бензин метанола.

Будучи жидкостью, метанол может храниться и распределяться с использованием обычной бензиновой инфраструктуры и оборудования с учётом требований по совместимости материалов.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

Метанол – яд, действующий на нервную и сосудистую системы. Токсическое действие метанола обусловлено так называемым «летальным синтезом» – метаболическим окислением в организме до очень ядовитого формальдегида. Кроме того, метанол обладает кумулятивными свойствами, то есть имеет свойство накапливаться в организме.

Приём внутрь 5...10 мл метанола приводит к тяжёлому отравлению (одно из последствий – слепота), а 30 мл и более – к смерти.

Метиловый спирт, поступивший в организм, распределяется между органами и тканями. Наибольшее количество его накапливается в печени, а затем в почках. Меньшее количество этого спирта накапливаются в мышцах, жире и головном мозге.

Симптомы отравления зависят от дозы. При легком отравлении отмечается быстрая утомляемость, головная боль, тошнота. Отравления средней тяжести сопровождаются сильной головной болью, головокружением, тошнотой, рвотой и угнетением центральной нервной системы. Расстройства зрения начинаются через 2...6 дней и могут быть временными и постоянными в виде полной слепоты. При тяжёлом отравлении после таких начальных симптомов, как головная боль, тошнота и рвота, опьянение быстро развивается кома. Смерть наступает от паралича дыхания и ослабления сердечно-сосудистой деятельности (примерно у 25% больных с тяжелыми отравлениями) на фоне выраженного некомпенсированного метаболического ацидоза [96].

Одновременное поступление метилового и этилового спиртов в организм уменьшает токсичность метилового спирта. Это объясняется тем, что этиловый спирт уменьшает скорость окисления метилового спирта почти на 50 % и, следовательно, уменьшает его токсичность.

Особая опасность метанола связана с тем, что по запаху и вкусу он неотличим от этилового спирта, из-за чего и происходят случаи его употребления внутрь.

Этанол

Этанол (этиловый спирт) – второй представитель гомологического ряда одноатомных спиртов представляет собой бесцветную летучую жидкость с характерным запахом.

Получение

Существует два основных способа получения этанола — микробиологический (спиртовое брожение) и синтетический (гидратация этилена). Первый способ представляет бóльший интерес, т.к. в нём используется возобновляющееся сырьё.

Современная промышленная технология получения этилового спирта из пищевого сырья включает следующие стадии:

- подготовка и измельчение крахмалистого сырья — зерна, картофеля, кукурузы и т.п.;
- ферментация. На этой стадии происходит ферментативное расщепление крахмала до сбраживаемых сахаров¹. Для этих целей применяются рекомбинантные препараты альфа-амилазы, полученные биоинженерным путём — глюкамилаза, амилосубтилин;
- брожение. Благодаря сбраживанию дрожжами сахаров происходит накопление в бражке спирта. Поскольку спирт – токсичное вещество, то накопление происходит до уровня примерно 12...15% об., после чего дрожжи погибают, и процесс брожения прекращается;
- брагоректификация. Осуществляется на ректификационных колоннах.

Отходами бродильного производства являются углекислый газ, барда, эфирно-альдегидная фракция, сивушный спирт и сивушные масла.

Этиловый спирт получают также из сырья, содержащего целлюлозу (древесина, солома и т.п.), которую предварительно гидролизуют. Образовавшуюся при этом смесь пентозных (C₅) и гексозных (C₆) сахаров подвергают спиртовому брожению.

Этанол, полученный брожением, представляет собой водно-спиртовую смесь, содержащую примеси. Для его промышленного и топливного применения необходима очистка.

Фракционная перегонка (ректификация²) позволяет получить этанол с концентрацией около 95,6% мас.; эта неразделимая перегонкой азеотропная смесь содержит 4,4% воды (мас.) и имеет температуру кипения 78,15°C.

¹ Обычные дрожжи могут расщеплять сахара с максимальным количеством атомов углерода в молекуле до шести (например, C₆H₁₂O₆ – глюкоза).

² Ректификация — разделение жидких смесей на практически чистые компоненты, отличающиеся температурами кипения, путём многократных испарений жидкости и конденсации паров.

Абсолютный спирт — этиловый спирт, практически не содержащий воды, получают в последнее время при помощи молекулярных сит¹.

Этанол — это наиболее распространенное биотопливо на сегодняшний день. Начиная с 1970-х годов было построено множество мелких перегонных установок в Азии, Латинской Америке, Африке и США. В качестве сырья для производства этанола используется огромное разнообразие растительного сырья — от маниоки и винограда до отходов консервных заводов и сырной сыворотки. В южной Европе для этой цели даже используются избытки низкокачественного вина. Однако около 80% производимого в настоящее время этанола производится из сахарного тростника в Бразилии и кукурузы в США.

Опыт Бразилии наиболее интересен. Уже в 1970-х годах Бразилия была одной из основных стран производителей сахара и к этому времени имела большой опыт производства этанола. С 1930-х годов в Бразилии производился автомобильный бензин, содержащий от 5 до 25% этанола. Частично это мотивировалось стремлением правительства контролировать весьма непостоянный сахарный рынок.

Когда в 1979 году цены на нефть резко взлетели вверх, а цены на сахар упали, Бразилия приняла очевидное решение наращивать производство этанола. Правительство тесно сотрудничало как с производителями автомобилей, так и с поставщиками топлива с целью полной замены бензина на этанол. К 1984 году более 90% автомобилей, проданных в Бразилии, работали на чистом этаноле.

Однако с падением цен на нефть в 1986 году и увеличением цен на сахар производители сахарного тростника отказались от производства этанола в пользу сахара. Поставки этанола резко сократились, что привело к дефициту данного топлива. В начале 1990-х годов производство автомобилей, работающих на чистом этаноле, сократилось

¹ Молекулярные сита — кристаллические алюмосиликаты, имеющие трёхмерную структуру из тетраэдров оксида кремния и оксида алюминия и характеризующиеся точным и однородным размером пор. Поры в молекулярных ситах достаточно велики, чтобы пропускать небольшие молекулы, но в то же время они задерживают более крупные молекулы, что определило их использование в качестве осушителей и адсорбентов.

почти до нуля. Этанол продолжали производить, однако он добавлялся в бензин, обычно в количестве 20%.

В конце 1990-х годов Бразильские автопроизводители приняли технологию автомобиля с изменяемым составом топлива (англ. *flexible-fueled*) из США. Такие автомобили способны работать на смеси бензина и этанола в любой пропорции. Хотя они не полностью используют все уникальные свойства этанола как автомобильного топлива, тем не менее, они позволяют владельцу гибко приспосабливаться к составу поставляемого на рынок топлива. В 2006 году около 80% проданных в Бразилии автомобилей использовали данную технологию.

Тем временем цены на нефть опять выросли, потянув за собой и цены на этанол. Производители сахарного тростника опять переключились с сахара на производство этанола. Производство достигло 18 млн литров в 2006 году. Подсчитано, что этанол конкурентоспособен с бензином при цене на нефть около 35 долларов за баррель.

Бразилия проводила последовательную политику в области этанола в течение трёх десятилетий, обязывая добавлять этанол в бензин в количестве от 19 до 25%, облагая чистый бензин высокими налогами и в течение первых двух десятилетий предлагая целый набор субсидий производителям этанола. Она продолжала проводить эту политику, даже став одним из основных производителей нефти, и невзирая на периодические снижения цен на нефть. Это обошлось в значительную сумму (её никто ещё не оценивал), однако сейчас при высоких ценах на нефть Бразилия в выигрыше, имея непревзойдённую в мире индустрию этанола.

Но ситуация в Бразилии уникальна. К началу 1980-х годов Бразилия уже имела высокоэффективную индустрию сахарного тростника. Изобилие земель, благоприятный климат, развитая национальная автоиндустрия, отсутствие национальных нефтяных ресурсов и широкие перспективы исследовательских работ в сельском хозяйстве и этанольной промышленности. Инновации, подобные когенерации электричества при сжигании ранее не используемого жмыха, позволили не только повысить эффективность производства этанола, но и получать прибыль от продажи избыточного электричества в общую сеть.

Ни одна другая страна мира, включая и США, не имеет такого благоприятного набора обстоятельств.

США также начали субсидировать производство этанола в начале 1970-х годов. Вместо сахарного тростника в качестве сырья для производства этанола здесь использовалась кукуруза. Из одного бушеля (25,4 кг) кукурузы можно произвести 2,8 галлона (10,6 литра) биоэтанола. Субсидии были достаточно высоки (10 центов за литр этанола и более), т.к. себестоимость производства этанола из кукурузы в США была существенно выше себестоимости бразильского этанола. Выращивание кукурузы требует значительно бóльших затрат энергии, а существующий способ сбора урожая (собираются только зерна, а остальное остаётся на поле¹) не позволяет использовать остатки для получения дополнительной энергии.

Американское кукурузно-этанольное лобби действовало чрезвычайно успешно. Высокие субсидии и жесткие тарифы стимулировали импорт бразильского этанола. Единственное проведенное исследование в этой области показывает, что в 2006 году на поддержку этанола США израсходовали более 5 млрд долларов. Эта цифра имеет тенденцию к росту в будущем. Из этих 5 млрд 3 млрд – это субсидии в размере 51 цент за галлон этанола, 1 млрд, – субсидии производителям кукурузы, остальное – различные федеральные и местные программы. Если подобные огромные субсидии будут доступны и для других альтернативных топлив, это сделает их конкурентоспособными с нефтяными топливами.

Более многообещающий способ производства этанола называется «биотопливом второго поколения». Имеется в виду топливо, производимое из огромного разнообразия сырья, содержащего растительную целлюлозу: травы, древесины, муниципальных отходов, отходов сельского хозяйства. Эти материалы могут быть преобразованы в этанол или ряд жидких и газообразных топлив. Привлекательность данной технологии заключается в том, что в качестве сырья предлагается использовать бросовые материалы или отходы.

К 2010 году в США 28 компаний занимались разработками

¹ Для сохранения плодородных свойств почвы.

технологий и производством биоэтанола из целлюлозы [97].

Повышенный интерес США к этанолу определяется скорее политическими, чем экологическими причинами. Основные цели, преследуемые администрацией США, – снизить зависимость от импортируемой нефти, поддержать национальное сельское хозяйство, создать дополнительные рабочие места и, наконец, сократить выбросы парниковых газов в атмосферу. Энергетическое агентство США подсчитало, что в стране достаточно сельскохозяйственных и лесных сырьевых ресурсов, способных на экологически устойчивой основе обеспечить замещение 30% потребляемой в 2010 году нефти биотопливами [98, 99].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Этанол может использоваться непосредственно, однако этанол, так же как и метанол, обладает высокой теплотой испарения. Это может создать определённые проблемы с холодным запуском двигателя. Чтобы избежать этой проблемы, обычно используют смесь бензина с этанолом.

За рубежом в ДВСПВ практическое применение получили смеси 10...20% этанола с нефтяными бензинами, получившие название «газохол». Согласно стандарту ASTM, разработанному национальной комиссией по спиртовым топливам США, газохол с 10% этанола (E10) характеризуется следующими показателями: плотность 730...760 кг/м³, температурные пределы выкипания 25...210°C, теплота сгорания 41,9 МДж/кг, теплота испарения 465 кДж/кг, давление насыщенных паров (38°C) 55...110 кПа, вязкость (при -40°C) 0,6 мм²/с, стехиометрический коэффициент 14. Таким образом, по большинству показателей газохол соответствует автомобильным бензинам.

Этанол характеризуется высокой растворимостью в воде. Поэтому при попадании в смесь бензина и этанола даже небольшого количества воды, она расслаивается, т.е. бензин всплывает, а этанол, растворившись в воде, тонет. При использовании обводненного этанола в условиях пониженных температур окружающей среды для предотвращения расслоения в смесь необходимо вводить стабилизаторы, в качестве которых используют пропанол, втор-пропанол, изобутанол и др. Так, добавка 2,5...3,0% изобутанола обеспечивает

устойчивость смеси этанола, содержащего 5% воды, с бензином при температуре до -20°C [100].

По сравнению с бензином топливо E85 (85% этанола, 15% бензина) обладает меньшей энергетической ценностью, но для его сгорания требуется меньше кислорода, поэтому в цилиндры можно впрыскивать большие количества топлива. В итоге мощность двигателя падает, но незначительно. Топливо E85 может быть использовано только в специально приспособленных для этого автомобилях. С этой точки зрения широкое внедрение данного топлива в США (на начало 2010 г в США функционировало более 1900 заправочных станций, продающих данное топливо) обеспечивает поддержку национальных автопроизводителей, разработавших и внедривших технологию Flex Fueled Vehicles (на начало 2010 года в США эксплуатировалось более 8 млн таких автомобилей) [101].

Подобно метанолу этанол несовместим с использованием некоторых конструкционных материалов, используемых в автомобилестроении. Несовместимы с этанолом следующие металлы: цинк, латунь, свинец, алюминий, свинцово-оловянный сплав (который широко используется для покрытий бензобаков) и свинцовый припой. Вместо этих материалов используют металл без покрытия, нержавеющую сталь, чугун и бронзу. Из неметаллов этанол несовместим с резиной, полиуретаном, пробкой, кожей, ПВХ, полиамидами, метил-метакрилатными пластиками и некоторыми термопластиками. Совместимые материалы: термопластичные стеклопластики, неопреновая резина, полипропилен, нитрил¹, Viton™ и Teflon™.

Ещё одна проблема этанола – он, в отличие от бензина, является проводником электричества.

Эти особенности следует учитывать при проектировании автомобилей, работающих на этаноле, а также инфраструктуры топливозаправок.

Хотя спирты – метанол и этанол – могут использоваться в ДВСВС вместо дизельного топлива, однако оба вида спиртов по сравнению с дизельным топливом имеют принципиальные недостатки, требующие

¹ Нитрил – синтетический каучук, созданный путём сополимеризации бутадиена и акрилонитрила, в паре образующих нитрильный эластомер.

значительных изменений конструкции двигателя и аппаратуры впрыска топлива. Спирты обладают незначительной способностью к самовоспламенению (цетановое число 3...8), незначительной объёмной теплотворной способностью, высокой теплотой испарения, незначительными смазывающими свойствами, а также более высокой склонностью к коррозионному воздействию. Поэтому используются смеси спирта с дизельным топливом, хотя эти жидкости смешать без присадок практически невозможно. Следовательно, их применение требует ввода большего количества растворителей. Незначительная способность к воспламенению требует добавления большой доли присадок, ускоряющих воспламенение. Высокая концентрация присадок ухудшает экономичность этого направления работ. Преимуществом при использовании спиртов в дизелях является снижение уровней дымности ОГ и выбросов NO_x [102].

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

В зависимости от дозы, концентрации, пути попадания в организм и длительности воздействия этанол может обладать наркотическим, наркозным и токсическим действием. В определённых дозах к массе тела и концентрациях приводит к острому отравлению и смерти (смертельная разовая доза – 4...12 грамм этанола на килограмм веса). Однако этанол является естественным метаболитом человеческого организма, и в определённых дозах используется в медицине как самостоятельное лекарственное средство, а также как растворитель фармацевтических препаратов, экстрактов и настоек.

Злоупотребление алкогольными напитками может привести к алкоголизму. Основная проблема – предотвращение употребления этанола в качестве алкогольного напитка. Для этой цели этанол подвергают денатурации – добавке в него бензина или других веществ.

Основным экологическим преимуществом биоэтанола является то, что он, в отличие от нефти, газа или угля, представляет собой возобновляющийся энергоноситель. Более того, в некоторых случаях он может быть получен из органических отходов. Этанол легче, чем бензин подвергается биодegradации или растворению до безопасных концентраций.

Расчёты энергетической эффективности производства биоэтанола в США показывают наличие положительного энергетического баланса. Примерно 60% энергии содержащейся в биоэтаноле расходуется на его производство, 40% – чистый выход энергии [103].

Хотя выбросы CO, CH и NO_x при использовании спиртовых топлив уменьшаются, вместе с тем в составе CH увеличивается относительная доля альдегидов, которые раздражают слизистые оболочки глаз человека. Кроме того, биоэтанол, произведенный из кукурузы, не обеспечивает значительных преимуществ по выбросам парниковых газов. Тщательный анализ результатов множества исследований в этой области свидетельствует о том, что использование биоэтанола, произведенного из кукурузы, обеспечивает снижение выбросов CO₂ в жизненном цикле около 20% по сравнению с бензином, произведенным из традиционной нефти. Однако эта цифра сильно варьируется в зависимости от конкретных особенностей выращивания сырья, технологии получения этанола, процедур транспортировки сырья и продукции, способов получения энергии (тепловой и электрической), необходимой для производственных процессов. Внедрение технологий производства этанола «второго поколения», т.е. из целлюлозы, обеспечивает снижение выбросов CO₂ в жизненном цикле до 120% по сравнению с бензином, произведенным из традиционной нефти [104].

Существуют однако некоторые методологические неясности, в частности, в нескольких исследованиях (Mark Delucchi, Timothy Searchinger и другие) утверждается, что учёт так называемых «непрямых изменений в землепользовании» может существенно увеличить выбросы CO₂ при использовании биотоплив. Исходная предпосылка такого утверждения заключается в том, что перевод пахотной земли в категорию для производства сырья для биотоплив (например, в штате Айова) приводит к необходимости включения в хозяйственный оборот новых, ранее не используемых земель (например, прерий или дождевых лесов), где-нибудь ещё в мире. Почва естественных экосистем содержит огромное количество углерода, связанного в органическом веществе, которое при хозяйственном освоении (вспашке, главным образом) окисляется, высвобождая в атмосферу CO₂. Наконец, если предположить, что для компенсации земель, переведенных с

выращивания пищевых культур на технические, потребуется освобождение новых территорий в тропических лесах, необходимо учитывать выбросы CO_2 при выжигании леса, поскольку именно такой способ расчистки новых территорий преобладает в настоящее время. К сожалению, количество этих выбросов пока точно не определено. Поэтому сделать определенные количественные оценки эффективности этанола в плане изменения выбросов CO_2 пока затруднительно.

Кроме вышеперечисленного, существует ещё одна проблема: перевод кукурузы из пищевой в техническую культуру существенно влияет на рынок продуктов питания, увеличивая цены на продовольствие. В 2006...2007 годах этот процесс сопровождался резким (50%) ростом цен на кукурузу, причём не только в США, но и по всему миру. Это имело далеко идущие последствия: подорожала говядина (т.к. кукуруза – это корм для скота), в некоторых районах подорожала более чем вдвое пахотная земля, подорожала соя (т.к. сократились площади её выращивания из-за предпочтения кукурузе), подорожал более чем вдвое кукурузный хлеб в Мексике, что даже привело к массовым беспорядкам. С другой стороны, некоторые исследователи отмечают, что увеличение стоимости кукурузы лишь незначительно влияет на повышение цен на продовольствие (в США), т.к. стоимость сырья составляет лишь небольшую долю в конечной цене продуктов питания.

Трет-бутиловый спирт (ТБС)

Трет-бутанол или **трет-бутиловый спирт (ТБС)** – бесцветная жидкость или бесцветные ромбические кристаллы с камфорным запахом, смешивается со многими органическими растворителями. Неограниченно растворим в воде, образует с ней азеотропную смесь. По химическим свойствам трет-бутанол – типичный алифатический спирт.

Получение

Основной промышленный метод получения третичного бутилового спирта – взаимодействие 40...65%-ной серной кислоты с изобутиленом, содержащимся во фракциях C_4 термического и каталитического крекинга нефтепродуктов.

Биобутанол получают из того же самого сельскохозяйственного сырья, что и этанол (т.е. из кукурузы, пшеницы, сахарной свеклы, сорго, кассавы и сахарного тростника). Существующие мощности по производству этанола могут быть рентабельно модернизированы под производство биобутанола (необходимы незначительные изменения процессов ферментации и дистилляции).

Однако в микробиологическом процессе ферментации бутанола есть одна парадоксальная особенность: хотя бутанола-образующая бактерия (*Clostridia acetobutylicum*) создает энзимы, которые конвертируют простые сахара в алкоголь, сам бутанол токсичен для этих микробов. Результатом такого бутанолового ингибирования является низкая концентрация спирта в ферментирующей среде, что приводит к снижению выхода бутанола и увеличению издержек производства.

В будущем появятся способы получения биобутанола из лигноцеллюлозного сырья быстрорастущих энергоёмких зерновых культур (например, трав) или сельскохозяйственных отходов (например, стержни кукурузы). Данное направление развивается не только за счёт генноинженерной модификации микроорганизмов, расщепляющих целлюлозу и производящих из сахаров бутанол, но и в направлении совершенствования мембранных технологий разделения водно-бутанольных смесей, а также исследования немикробиологических методов получения биобутанола, например, при помощи пиролиза биомассы [105, 106].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Трет-бутанол (биобутанол) используют в качестве антидетонационной добавки к бензину.

Биобутанол имеет ряд преимуществ перед метанолом и этанолом как моторное топливо. Энергетическая ценность биобутанола ближе к таковой для бензина (всего на 10% меньше). Бутанол менее летуч по сравнению с метанолом и этанолом, может смешиваться с бензином в более высоких концентрациях (до 16% об.) без переделки двигателя.

В присутствии воды смесь, содержащая биобутанол, в меньшей степени склонна к расслоению, чем смеси этанола/бензина, и потому это позволяет использовать существующую инфраструктуру дистрибуции, не

требуя модификаций установок для смешивания, хранилищ или заправок.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

При вдыхании паров или приёме внутрь ТБС вызывает головокружение, сонливость, головную боль, тошноту и рвоту. При попадании на кожу вызывает её покраснение, а при длительном контакте – дерматит, при попадании в глаза – покраснение и боль.

Способность к биодegradации в почве у ТБС значительно выше, чем у МТБЭ, ЭТБЭ, ТАМЭ и других эфиров, поэтому при утечках ТБС возникновение значительных масштабов загрязнения маловероятно. ТБС не накапливается в организмах и не токсичен для водных организмов. ТБС не обладает мутагенным эффектом. Сведений о канцерогенности и тераторгенности ТБС накоплено пока недостаточно [107].

Растительные масла

Получение

Получают растительные масла из масличных культур (рапс, кукуруза, соя и т.д.) по классическим «пищевым» технологиям. Но чаще всего топливо производят из рапса, как наиболее дешёвого среди растительных масел. С 1 гектара посевов этого растения можно получить более 1000 литров масла. Сырьё очищается, сушится и подаётся на пресс, отжимающий масло. После отжима масло отстаивается, фильтруется и охлаждается.

Растительные масла могут относиться ко всем трём поколениям биотоплив, в зависимости от того, будут ли они производиться из «пищевого» сырья, отходов или водорослей.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Содержание кислорода в химической структуре растительных масел достигает более 10%, они хорошо растворяются в дизельном топливе. Растительные масла имеют высокое цетановое число, а присутствие кислорода повышает полноту сгорания топлива.

Они могут использоваться в качестве топлива для ДВСВС как в чистом виде, так и в смеси с дизельным топливом.

Смеси дизельного топлива и растительного масла не расслаиваются даже в присутствии воды. Они обладают отличными смазывающими свойствами, снижая трение и износ в двигателе. Растительные масла также способствуют очищению системы питания двигателя.

Однако и здесь существуют проблемы. Одна из них заключается в том, что растительные масла обладают высокой вязкостью. Для уменьшения вязкости применяют разбавители – спирты, эфиры или дизельное топливо. Наиболее распространено добавление 20% растительного масла к обычному дизельному топливу – такая смесь носит название В20. При её использовании нет необходимости вносить какие-либо изменения в конструкцию дизельного двигателя. При использовании чистого растительного масла (В100) необходимо заменить резиновые прокладки и уплотнители на нерезиновые (например, изготовленные из материала Viton™).

Другая проблема – склонность растительных масел к образованию нагара в камере сгорания. Эту проблему пытаются решить при помощи введения в камеру сгорания катализаторов, например, нихрома.

Наконец, растительные масла имеют меньшую скорость сгорания, что приводит к увеличению тепловых потерь, а следовательно, к некоторому ухудшению экономичности. При использовании чистого растительного масла экономичность и мощность снижаются на 10%, а при использовании топлива В20 – на 2%. Этот недостаток пытаются устранить путём добавления в топливо активаторов горения типа ферроцена или органических перекисей.

При низких температурах могут образоваться отложения в виде кристаллов воска, что ведёт к закупорке топливного фильтра. Эта проблема усугубляется в холодное время года. Кроме того, растительное масло может разлагать лакокрасочное покрытие кузова автомобиля.

При использовании растительного масла снижаются выбросы практически всех ЗВ. Особенно важно то, что при этом снижаются выбросы канцерогенных и токсичных компонентов. В табл. 12 представлены значения относительного снижения выбросов некоторых

ЗВ при использовании чистого растительного масла (B100) и 20% смеси с дизельным топливом (B20) [108].

Таблица 12

Снижение выбросов ЗВ при использовании растительного масла в ДВСВС

Вещество	B100	B20
CO	-43,2%	-12,6%
CH	-56,3%	-11,0%
ДЧ	-55,4%	-18%
NO _x	+5,8%	+1,2%
SO ₂	-100%	-20%
Токсичные вещества	-60% ... -90%	-12% ... -20%
Мутагенные вещества	-80% ... -90%	-20%

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

Растительные масла нетоксичны и при попадании в окружающую среду быстро и относительно безвредно разлагаются. Растительные масла, как показали опыты, при попадании в воду не причиняют вреда растениям и животным. Кроме того, они подвергаются практически полному биологическому распаду: в почве или в воде микроорганизмы за 28 дней перерабатывают 99% растительного масла, что позволяет говорить о минимизации загрязнения рек и озёр.

Метилловые эфиры жирных кислот (МЭЖК)

Получение

Кроме растительных масел в качестве топлива для дизельных двигателей могут использоваться **метилловые эфиры жирных кислот (МЭЖК)** (англ. *fatty acid methyl ester, FAME*), получаемые из жиров растительного и животного происхождения.

Основное количество алкилированных эфиров производится в настоящее время по технологии каталитической трансэстерификации

жирных кислот совместно с метанолом, поскольку она является наиболее экономичной.

Сначала в очищенное от механических примесей масло добавляют метиловый спирт в соотношении 10:1 и в качестве катализатора — щёлочь (метилат натрия). Смесь имеет следующий примерный состав: 87% жира, 12% метанола, 1% щелочи. Эту смесь нагревают до 50°C. После отстаивания и охлаждения она расслаивается на две фракции: лёгкую и тяжёлую. Лёгкая фракция представляет собой метиловый эфир; тяжёлая — глицерин. Примерный состав получаемых продуктов – 86% метилового эфира, 9% глицерина, 4% метанола и 1% осадка, который можно использовать в качестве органического удобрения.

После очистки от избыточного метанола и глицерина метиловый эфир можно использовать в качестве самостоятельного топлива или добавки к дизельному топливу.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Преобразованием жиров в эфир улучшаются низкотемпературные свойства, вязкость и температурная стабильность этого биотоплива. Благодаря такой обработке растительные эфиры подходят как топливо для дизелей несколько лучше, чем чистые растительные масла.

Тем не менее, даже при использовании переработанных в эфир растительных масел остается множество проблем, например:

- несовместимость с эластомерами (утечки через уплотнения);
- коррозия деталей из алюминия и цинка;
- наличие воды в смесях с дизельным топливом;
- слишком низкая окислительная стабильность (наиболее стабилен рапсовый эфир);
- отложения глицерина;
- более высокий модуль сдвига (недопустимо высокие давления впрыскивания могут повредить ТНВД);
- высокая вязкость при низкой температуре и т.д.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

Существенных преимуществ в отношении содержания ЗВ в ОГ у метиловых эфиров нет. Замкнутый кругооборот CO_2 также не является преимуществом, так как для возделывания растений, сбора урожая, транспортировки и подготовительных операций необходимо затратить значительное количество энергии. Максимальная экономия ископаемых энергоносителей при применении рапсового эфира теоретически составляет 65%, а на практике едва достигает 50% [102].

Диметиловый эфир (ДМЭ)

Получение

В качестве первичного сырья для производства **диметилового эфира** используют природный газ, уголь или биомассу. Из первичного сырья получают синтез-газ, из него – метанол, который является непосредственным сырьём для производства ДМЭ.

В промышленности ДМЭ получают в качестве побочного продукта при производстве метанола из синтез-газа на оксидных цинк-хромовых и медьсодержащих катализаторах при температурах 200...400°C и давлениях 4...40 МПа.

Перспективно получение ДМЭ дегидратацией метанола при 300...400°C и 2...3 МПа в присутствии гетерогенных катализаторов – алюмосиликатов (степень превращения метанола в ДМЭ ≈60%) и цеолитов (селективность процесса близка к 100%).

ДМЭ получают также напрямую из синтез-газа на полифункциональных катализаторах при 200...250°C и давлении 7...9 МПа; степень превращения метанола в диметиловый эфир составляет 59...88% [109].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

При нормальных условиях ДМЭ принимает газообразное состояние, но при давлении 0,2...0,5 МПа – сжижается. Молекулы ДМЭ не имеют химических связей углерод–углерод, что исключает образование в пламени радикалов C_2 , способствующих сажеобразованию при сгорании.

К благоприятным физико-химическим параметрам ДМЭ относят повышенную испаряемость, что снижает требования к дисперсности распыления, позволяет понизить давление впрыска и обеспечивает хорошее смесеобразование. Отличная самовоспламеняемость в ДВСВС (у ДМЭ цетановое число ЦЧ=55...60 по сравнению с ЦЧ=45...50 для дизельного топлива) улучшает пусковые качества и способствует «мягкому» сгоранию. Высокое содержание в ДМЭ связанного кислорода (35%) повышает полноту сгорания. ДМЭ не содержит серы, что важно с точки зрения использования систем очистки ОГ. Двигатель на ДМЭ хорошо запускается зимой при $-25...30^{\circ}\text{C}$.

К недостаткам ДМЭ можно отнести пониженную теплоту сгорания топлива (около 30 МДж/кг) и меньшую вязкость (0,25 сСт) по сравнению с дизельным топливом (43 МДж/кг и 2,5 сСт). Из-за низкой вязкости и плохих смазочных свойств необходимо введение в ДМЭ специальных противозадирных присадок. ДМЭ обладает высокой коррозионной агрессивностью к некоторым материалам и покрытиям.

Применение ДМЭ в ДВСВС не требует радикальных изменений, но необходима установка газобаллонного оборудования, корректировка цикловой подачи и угла опережения впрыска топлива, принятие мер, исключающих появление «паровых пробок» в топливных магистралях и насосах. Цикловая подача увеличивается примерно в 1,6...1,9 раза, а для устранения вероятности появления «паровых пробок» сжиженный ДМЭ, хранящийся в баллоне, дожимают топливным насосом до давления 1,5 МПа.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

Проводившиеся в 2004 г. эксплуатационные испытания партии грузовиков ЗИЛ-5301, переоборудованных для работы на ДМЭ, показали снижение выбросов NO_x в 3...5 раз, CO и CH – наполовину при использовании окислительного нейтрализатора ОГ, практически полное отсутствие дымности ОГ, уменьшение внешнего шума на 2...8 дБА. Двигатель соответствовал нормам Евро-3. При работе на ДМЭ выявлено сохранение, а на некоторых режимах и улучшение до 5% экономичности дизеля, повышение его эффективного КПД по сравнению с работой на дизельном топливе [110].

ДМЭ является слабым наркотиком. Огнеопасен, смесь с воздухом взрывоопасна. ПДК в воздухе рабочей зоны составляет 200 мг/м³.

Синтетические топлива и биотоплива

Синтетические топлива представляют собой углеводородные аналоги бензина или дизельного топлива, однако произведённые не из нефти, а из другого первичного сырья: природного газа, угля или биомассы (англ. *gas to liquid – GtL; coal to liquid – CtL and biomass to liquid – BtL*).

Целью производства синтетических топлив является замещение первичного нефтяного сырья при максимальном сохранении всех потребительских свойств традиционных нефтяных топлив.

В случае использования в качестве первичного сырья природного газа или угля речь идёт о расширении сырьевой базы транспортных топлив и об удобстве обращения именно с жидкими топливами.

В случае использования в качестве первичного сырья биомассы появляются основания рассматривать такое топливо как возобновляющийся ресурс с низким «углеродным следом».

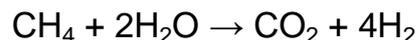
Получение

Процессы получения синтетических топлив можно разделить на два типа: без газификации или с газификацией сырья.

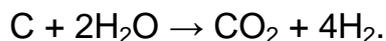
Производство без газификации сырья базируется на процессе гидрообработки масел и жиров (англ. *hydroprocessing of oils and fats, HOF*). В ходе данного процесса растительные масла или животные жиры после соответствующей подготовки подвергаются каталитическому гидрокрекингу с последующей гидроочисткой, в результате чего получают углеводороды, пригодные для формирования синтетического дизельного топлива и бензина.

Последовательность производства синтетических топлив с газификацией сырья различается лишь на стадии получения синтез-газа из первичного сырья (природного газа, угля, биомассы или непосредственно из воздуха).

Синтез-газ производится методом паровой конверсии метана (природного газа или биогаза):



или угля:



В случае использования биомассы, её газифицируют (т.е. трансформируют в синтез-газ) в ходе различных процессов (например, пиролиза, торрефикации¹, плазменного разложения).

Синтез-газ можно также получать непосредственно из CO_2 и H_2O , содержащихся в воздухе.

«Сырой» синтез-газ может иметь различный состав в зависимости от используемого сырья, поэтому его необходимо очистить от примесей и кондиционировать.

Далее реализуются процессы каталитического синтеза углеводородов:

- процесс Фишера-Тропша (англ. *Fischer-Tropsch, FT*);
- или процесс «Из метанола в бензин» (англ. *methanol-to-gasoline, MTG*).

Процесс Фишера-Тропша реализуется при давлении 0,1...3 МПа и температуре 190...270°C (низкотемпературный вариант синтеза) или 320...350°C (высокотемпературный вариант синтеза) в присутствии различных катализаторов (Fe-ZnO, Co-CrO). Поскольку в продуктах реакции присутствуют в основном парафиновые углеводороды, то из них в дальнейшем целесообразно получать синтетическое дизельное топливо.

Процесс «Из метанола в бензин» реализуется при температуре 300...600°C и давлении 1,4...2,8 МПа в присутствии Cu-Zn-Cr-катализаторов с получением в качестве промежуточных продуктов метанола и диметилового эфира, а затем, в присутствии цеолитного катализатора ZSM-5, лёгких олефиновых углеводородов.

Образующиеся в ходе реакций каталитического синтеза углеводороды подвергают дистилляции, изомеризации, крекингу,

¹ Торрефикация – процесс «мягкого» пиролиза биомассы, нагрева без доступа воздуха, который протекает при температурах 200...320°C и атмосферном давлении в течении 30...90 минут.

алкилированию и риформингу с тем, чтобы получить исходные компоненты для производства синтетического дизельного топлива или бензина. Теоретически, при помощи данных процессов можно синтезировать углеводороды любой молекулярной массы, вида и строения.

На последнем этапе формируют смеси углеводородов, аналогичные по своим потребительским свойствам бензину или дизельному топливу.

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Синтетические топлива производятся таким образом, чтобы соответствовать всем требованиям, предъявляемым к бензину и дизельному топливу. Поэтому они могут рассматриваться как полноценные аналоги этих топлив.

Воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды

Технологии переработки угля в жидкое топливо порождают множество вопросов со стороны экологов. Наиболее серьёзной является проблема выбросов углекислого газа. Работы Национальной лаборатории по возобновляемым источникам энергии США (National Renewable Energy Laboratory) показали, что в полном жизненном цикле выбросы парниковых газов для произведённых из каменного угля синтетических топлив примерно вдвое выше, чем для бензина. Выбросы прочих ЗВ также велики, однако, многие из них могут быть собраны в процессе производства.

Важной проблемой при производстве синтетического топлива является и высокое потребление воды, уровень которого составляет от 5 до 7 литров на каждый литр полученного топлива.

Оценки выбросов CO_2 в жизненном цикле производства синтетических топлив из биомассы (водорослей) пока дают слишком разнородные результаты (от $-2,6$ до $+7,3$ кг/мДж), чтобы можно было делать какие-либо выводы.

Очевидно, что экологические преимущества синтетических топлив могут проявиться в наибольшей степени только при условии

максимального использования на всех этапах их жизненного цикла возобновляющихся экологически приемлемых источников энергии и других экологически чистых технологий.

Водород и биоводород

Получение

Водорода в свободном состоянии на Земле практически нет¹, и для его получения необходимы доступное сырьё и первичные источники энергии. Более того, для получения водорода, согласно закону сохранения энергии, всегда необходимо затратить больше энергии, чем будет возможно из него получить.

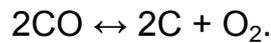
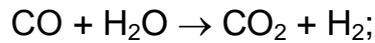
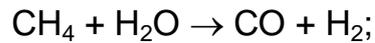
В настоящее время существуют два основных промышленных метода получения водорода: паровая конверсия углеводородов и электролиз. Среди перспективных, но пока находящихся в стадии экспериментов методов получения водорода можно выделить плазмохимический, термохимический, гелиотермический и биотехнологический методы.

Паровая конверсия углеводородов

Основной промышленный метод получения водорода использует в качестве первичного источника энергии различные виды невозобновляющегося органического топлива. Данным методом водород производится из природного газа (метод паровой конверсии метана) или из каменного и бурого угля или торфа (метод паровой конверсии углерода).

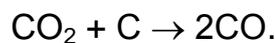
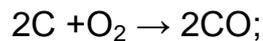
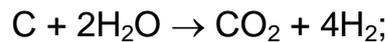
¹ Существует, однако, теория, согласно которой водород содержится в металлгидратах в земной коре и при определённых условиях, например, в ходе вулканической деятельности, высвобождается в атмосферу. В атмосфере водород содержится в концентрации 500 частей на миллиард и может диффундировать из атмосферы в космическое пространство, поскольку скорость теплового движения молекул водорода превышает вторую космическую скорость.

Реакцию паровой конверсии метана проводят в присутствии Ni-катализатора при высокой температуре (700...900°C) и давлении 2...3 МПа:



Содержание водорода в синтез-газе составляет 73...76% об.

Паровая конверсия углерода требует ещё более высоких температур – 900...1000°C:



Содержание водорода в синтез-газе составляет 65...68% об.

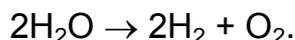
Методы паровой конверсии метана или углерода позволяют получать, строго говоря, не водород, а промышленный водородсодержащий синтез-газ, в котором водорода 65...76%. Выделение из синтез-газа чистого водорода является сложной операцией с использованием методов: глубокого охлаждения, адсорбции, абсорбции, диффузии через мембраны, катализа, электрохимической конверсии.

Синтез-газ также может быть получен при плазменном разложении углеводородного сырья различного происхождения (углеводороды, биомасса, отходы), однако данная технология пока не получила широкого применения.

Водород, полученный из ископаемых топлив, не является возобновляющимся энергоресурсом. Если, однако, первичным сырьём для производства метана, углерода или синтез-газа будет биомасса, то такой биоводород можно классифицировать как возобновляющийся энергоресурс. Биометан (биогаз) получают в ходе микробиологического анаэробного разложения органики: навоза, отходов сельского и лесного хозяйства, водорослей и т.п. Синтез-газ получают в ходе термолиза или плазменного разложения органики растительного или животного происхождения.

Электролиз

Второй промышленный способ получения водорода основан на электролизе или электрохимическом разложении воды либо водяного пара:



Электролизный метод используется для получения водорода чистого и высокочистого (с содержанием примесей < 0,1% об.) [111]. При разложении 1 л воды образуется ~ 1242 л водорода и 621 л кислорода.

Для электролиза необходима электрическая энергия, которая может быть получена множеством различных способов.

В настоящее время существуют три способа реализации электролизной технологии производства водорода, отличающиеся типом используемого электролита и условиями проведения электролиза. Основные характеристики этих способов представлены в табл. 13 [112].

Таблица 13

Способы реализации электролизной технологии производства водорода

Тип электролизёра	Энергозатраты, кВт·ч/м ³ H ₂	Температура, К	Производительность, м ³ H ₂ /ч	Давление, МПа	КПД, %
Щелочной	4,5...5,5	320...370	до 500	0,1...5	50...70
С твердым полимерным электролитом (ТПЭ)	3,5...4,5	350...370	до 100	0,1...15	80...90
С твердым оксидным электролитом	2,5...4	1070...1270	—	0,1...3	>85

Щелочной электролиз — процесс прохождения электрического тока через раствор электролита (20...30 % раствор КОН или NaOH) от анода к катоду, вследствие чего на них соответственно образуются газы: водород и кислород. Для получения водорода электролизом воды используют дистиллированную или обессоленную природную воду, что позволяет избежать накопления в электролите различных примесей.

Электролиз с твердо-полимерным электролитом (ТПЭ) исторически связан с появлением **перфторированной ионообменной**

мембраны «Нафион» фирмы DuPont. Первые электролизёры с ТПЭ были созданы в 1966 г. компанией General Electric. ТПЭ электролизёры в 5...7 раз дороже водно-щелочных с аналогичными характеристиками, но при этом имеют значительно меньшие массогабаритные характеристики и энергозатраты, повышенный уровень безопасности, возможность работы в нестационарных режимах, простое обслуживание, и в дополнение ко всему, можно получать компримированные газы (до 3 МПа и более) непосредственно в электролизёре. Важной особенностью систем электролиза воды с ТПЭ является то, что чистота производимого водорода (а также кислорода) соответствует качеству газов, необходимых для использования в топливных элементах с ТПЭ, которые сегодня начинают внедряться на транспорте и в децентрализованной энергетике (например, чистота водорода, полученного электролизом с ТПЭ, составляет не менее 99,98 %). Но и сами электролизные системы на основе ТПЭ предъявляют жёсткие требования к чистоте подаваемой воды. Несмотря на большой объём исследований и разработок в области электролизёров с ТПЭ, высокая стоимость мембраны (около 200 долларов на 1 м³/ч водорода при плотности тока 1 А/см²), электрокатализатор с применением драгоценных металлов (Pt, Ir, Ru), высокие требования к чистоте воды и конструкционных материалов (в основном, Ti) приводят к относительно высокой стоимости такого типа электролизёров. С другой стороны, стоимость производимого методом электролиза водорода обычно приблизительно на 70% состоит из стоимости электричества, поэтому снижение энергопотребления электролизёрами с ТПЭ позволяет компенсировать высокие капитальные затраты [112].

Высокотемпературный электролиз водяного пара проводится в ячейках с твердым электролитом на основе оксидов циркония, модифицированных добавками 10...15% (мол.) оксидов некоторых элементов для увеличения его электропроводимости. К таким оксидам относятся оксиды кальция, иттрия, иттербия, селена, ванадия. Подобный электролит обладает униполярной проводимостью; ток через него переносится ионами кислорода, образующимися при диссоциации воды и выделении водорода на катоде. Водород отводится из катодного пространства вместе с неразложившимся паром. При реализации этого

процесса создаётся возможность резкого сокращения расхода электроэнергии на производство электролитического водорода путём замены части её тепловой энергией, например, от ядерного реактора. Лучшее использование тепловой энергии достигается на комбинированной установке, сочетающей высокотемпературный электролиз с энергетической системой для утилизации тепла в паровом котле и турбогенераторе [112].

Получение водорода электролизом воды в настоящее время – процесс чрезвычайно дорогой, по затратам энергии он практически равен количеству энергии, получаемой при сгорании водорода в двигателе.

Главные преимущества этого способа производства водорода заключаются в возобновляемости запасов воды, возможности использования экологически приемлемых источников электричества, а также в отсутствии токсичных выбросов.

Плазмохимический метод

Плазмохимический метод использует химическую активность ионизованного газа – плазмы, является гораздо более производительным по сравнению с электролизом, удельная производительность установок которого не более 0,5 литра водорода с 1 см³. В специальные установки – плазмотроны подводят газы или пары различных веществ. Интенсивным электромагнитным полем в этих газах или парах создают электрические разряды, образуется плазма. Энергия электрического поля передается её электронам и от них нейтральным молекулам, которые переходят в возбужденное, химически активное состояние.

Особо перспективны неравновесные плазмохимические системы, где электроны, разогреты электромагнитным полем до температур 10...15 тыс.°С, избирательно передают энергию молекулам, а последние, распадаясь, образуют нужные химические продукты. При этом газ в целом остается относительно «холодным» (его температура 300...1000°С). Важное преимущество этих систем – объёмный характер протекающих в них процессов. Большие скорости химических реакций в газовой фазе позволяют добиваться гигантской удельной производительности плазмотронов.

Однако далеко не все газы и пары можно эффективно разлагать методами плазмохимии. У ряда соединений пока ещё не удаётся свести к

минимуму процессы **релаксации** – быструю потерю энергии молекулами, возбужденными разрядом, и предотвратить обратные реакции – **рекомбинацию**. К числу таких веществ относятся пары воды, так что их прямое плазмохимическое разложение на кислород и водород в настоящее время малоэффективно. А вот углекислый газ оказался идеальным плазмохимическим объектом. КПД при разложении CO_2 на CO и O_2 превышает 80 %.

С учётом этого можно организовать двухстадийный цикл производства водорода: на первой стадии осуществить плазмохимическое разложение CO_2 , а на второй — выполнить давно освоенную промышленностью реакцию взаимодействия CO с водяным паром, в результате которой образуется водород и CO_2 . В итоге формируется плазмохимический цикл, в котором тратится только вода, а CO_2 постоянно возвращается в процесс. Производительность такой плазмохимической системы в десятки тысяч раз превзойдет эффективность электролизёров, стоимость же водорода окажется примерно такой же, как и при электролизе [112].

В Институте имени И. В. Курчатова начаты эксперименты по диссоциации сероводорода в плазме, чтобы на одной стадии получать два продукта: водород и конденсированную серу. Для этого сероводородную плазму заставляют вращаться с околосвуковой скоростью. Образующиеся в плазмотроне кластеры (частицы) серы выносятся при этом из реакционного объёма за время, недостаточное для осуществления обратной реакции. Центробежный эффект позволяет добиться значительного отклонения плазмохимической системы от термодинамического равновесия и снизить энергозатраты на получение кубометра водорода до десятых долей кВт·ч. Такой водород оказывается дешевле электролизного примерно в 15 раз [112].

Термохимический метод

Термохимическое разложение воды — это преобразование воды в водород и кислород посредством ряда приводимых в действие теплотой химических реакций. Как известно, для прямого термического разложения воды на водород и кислород требуется высокая температура на уровне 2730°C . Однако воду можно термически разложить и при более низкой температуре, около 1000°C , как этого требует термохимический процесс

получения водорода с КПД до 50%. На отдельных стадиях процессов такого типа наряду с термическим воздействием для отщепления водорода может использоваться электричество (электролиз, плазма). Они называются гибридными термохимическими циклами или электротермохимическими процессами.

Тепловая энергия вводится в термохимический цикл через одну или более экзотермических высокотемпературных химических реакций. Для отвода энергии на выходе цикла используется одна или более эндотермических низкотемпературных реакций. Все реагенты, отличные от воды, восстанавливаются и вновь поступают в цикл. Таким образом, термохимические и комбинированные циклы по получению водорода — это многостадийное разложение воды с помощью различных химических реакций. Этим способом известно несколько десятков тысяч.

В термохимических и комбинированных циклах с точки зрения экономики и экологии вряд ли оправдано использование соединений мышьяка, ртути, ванадия, стронция, цезия, брома, йода, даже если они перспективны в отношении термодинамики. Наиболее конкурентоспособны циклы, в которых используются дешёвые и легкодоступные реагенты: оксиды железа, серы, углерода, хлориды железа.

Энергию, необходимую для разложения воды на водород и кислород, получают путём сжигания органического горючего. Недостатком такого термохимического цикла является то, что в качестве отхода в окружающую среду выбрасывается CO_2 (на 1 т водорода 10...50 т CO_2 , в зависимости от технологии процесса и природы исходного горючего) [112].

Гелиотермический метод

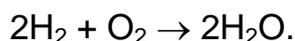
Вода распадается на водород и кислород при температуре 2730°C . Достигнуть этой температуры можно с помощью параболического отражателя или линзы, которая фокусирует солнечные лучи. С помощью солнечных концентраторов можно обеспечивать необходимым теплом термохимические циклы и другие высокотемпературные методы получения водорода. Теоретически солнечный концентратор позволяет осуществлять прямое термическое разложение воды — термолит.

Биотехнологический метод

Ещё одним перспективным способом получения водорода является биотехнологический. Биоводород выделяют в ходе своей жизнедеятельности некоторые бактерии (например, *Rhodobacter sphaeroides*, *Enterobacter cloacae*) и водоросли (например, *Chlamydomonas reinhardtii*). Энергетическая эффективность такого метода – коэффициент преобразования энергии солнечного света в водород – теоретически может достичь 7...10 % (водоросли в естественных условиях достигают в лучшем случае 0,1%). Генетически модифицированная одноклеточная водоросль *Chlamydomonas reinhardtii* может в течение долгого времени производить в пять раз больше водорода, чем его «естественный предок» и давать 1,6...2,0% энергетической эффективности [113].

Особенности использования в качестве автотранспортного топлива

Водород – самый лёгкий элемент во вселенной. При нормальных условиях он представляет собой бесцветный газ, не обладающий запахом и вкусом. Полное сгорание водорода в чистом кислороде приводит к образованию воды:



Водород может использоваться на автотранспорте в качестве самостоятельного топлива или добавки к бензину и дизельному топливу в ДВС, а также в качестве энергоносителя для электрохимических генераторов (топливных элементов – *Fuel Cell*).

Имея теплоту сгорания почти в три раза большую, чем нефтяные моторные топлива, коэффициент диффузии в 8 раз больший ($0,63 \text{ см}^2/\text{с}$), чем у бензина, температуру кипения -253°C , водородное топливо обеспечивает формирование высокоомогенной смеси в двигателе и исключает образование жидкой фазы в смеси. Температура сгорания водорода чрезвычайно высока – 2800°C . Минимальная воспламеняющая энергия электрического разряда для водорода почти в 10 раз меньше, чем для бензина. Октановое исследовательское число водородо-воздушной смеси зависит от её состава: при $\alpha=1$, оно довольно низкое – 46 единиц, а при $\alpha=3,5$ оно равно 114 единицам. Широкие пределы воспламенения (вплоть до $\alpha=5$), высокие скорости сгорания водородо-

воздушной смеси (в три раза выше, чем у бензина) оказывают положительное влияние на эффективность рабочего процесса, позволяют организовать качественное его регулирование (в ДВСПВ) и снизить насосные потери, что в сочетании с другими факторами (улучшением полноты сгорания, стабильностью состава смеси по цилиндрам) приводит к повышению эффективного КПД водородного ДВСПВ.

Высокие температуры цикла и наличие свободного кислорода в камере сгорания на режимах полных нагрузок способствует интенсивному образованию NO_x , однако на частичных нагрузках за счёт качественного регулирования (при $\alpha > 1,5$) эмиссия NO_x резко снижается. Концентрация других ЗВ в ОГ водородного ДВС крайне мала, т.к. они, главным образом, образуются при окислении небольших количеств моторного масла.

Наиболее эффективным способом подавления выбросов NO_x в водородном двигателе является понижение температуры топливоздушной смеси на впуске. Снижение температуры до -130°C за счёт подачи холодного газообразного водорода не только приводит к снижению примерно на порядок концентрации NO_x , но и даёт около 30% приращения мощности в результате увеличения массового наполнения цилиндра рабочей смесью.

Высокая температура самовоспламенения водородо-воздушных смесей затрудняет использование этого топлива в ДВСВС в чистом виде, поэтому водород используется в газодизельной системе питания.

Наиболее эффективное устройство, позволяющее использовать водород в качестве энергоносителя, – электрохимический генератор (ЭХГ) или «топливный элемент» (ТЭ), в котором окислитель (воздух) и восстановитель (водород) непрерывно подаются, соответственно, к катоду и аноду, а материал самих электродов в реакциях не участвует. Топливный элемент обладает наивысшими удельными характеристиками и КПД. В нём нет перемещающихся деталей, он бесшумен и кроме электроэнергии вырабатывает тепло. Топливный элемент – обратимое устройство, с помощью которого можно вырабатывать топливо (разлагать воду на кислород и водород), т.е. он может исполнять роль аккумулятора.

Хранение водорода на борту автомобиля

Проблемы хранения водорода на борту автомобиля аналогичны проблемам хранения природного газа, но ещё более выражены, т.к. плотность водорода при стандартных условиях почти в 10 раз меньше плотности метана, а температура кипения водорода на 90°С ниже, чем у метана.

Водород может храниться на борту автомобиля:

- в сжатом (сжатом) виде при давлении 15...25 МПа;
- в жидком виде при температуре –183...–253°С;
- в абсорбированном виде внутри кристаллической решётки гидридов металлов и интерметаллидов при температурах 0...300°С и давлении 0,1...3 МПа;
- в адсорбированном виде на поверхности цеолитов, активированных углей или углеродного волокна при температуре –208...–195°С и давлении 0,2...4,2 МПа;
- в химически связанном состоянии (химические гидриды).

В таблице 14 представлены характеристики некоторых способов хранения водорода на борту автомобиля [112].

Таблица 14

Характеристики некоторых способов хранения водорода на борту автомобиля

Способ хранения	Удельное потребление энергии, кВт·ч/кг H ₂	Удельный объём хранения, дм ³ /кг H ₂	Удельная масса хранения, кг/кг H ₂	Плотность хранения H ₂ , кг/м ³
Газообразный водород при давлении 20 МПа	0,93	81	16,0	7,7 ¹
Водород в гидридах	1,16	22	76,9	до 80
Жидкий водород	10,50	14	7,0	71
Криогенная адсорбция	3,20	59	20,0	0,5...20

¹ При давлении 10 МПа.

Компримированный водород

Для хранения и перевозки небольшого количества сжатого водорода при температурах от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$ используют стальные бесшовные 20...50-литровые баллоны с рабочим давлением до 20 МПа. Однако существуют цельнокомпозитные модели баллонов автотранспортного применения с обмоткой углеволокном (например, Q-LITE™ Hydrogen Tanks фирмы Quantum) с рабочим давлением 70 МПа, однако технология хранения водорода при таких высоких давлениях до конца не отработана.

Материалы для сосудов, работающих под давлением и их компоненты должны быть стойкими к водородному охрупчиванию в процессе всего срока эксплуатации. **Водородное охрупчивание** определяется как процесс, приводящий к уменьшению вязкости или пластичности металла за счёт проникания атомарного водорода. Восприимчивость к водородному разрушению возрастает с повышением давления водорода. Влияние температуры не является однозначным [114].

Сжиженный водород

Водород в жидком состоянии находится в узком интервале температур: от точки кипения $-252,87^{\circ}\text{C}$ до точки замерзания $-259,14^{\circ}\text{C}$, когда он переходит в твёрдое состояние.

Для охлаждения водорода до этой температуры требуется затратить около одной трети содержащейся в нём энергии (≈ 11 кВт ч/кг), а для создания криогенных устройств необходимы специальные материалы и технологии.

Главная часть криогенной системы хранения водорода — теплоизолированные сосуды, масса которых примерно в 4...5 раз меньше на 1 кг хранимого водорода, чем при баллонном хранении под высоким давлением. В криогенных системах хранения жидкого водорода на 1 кг водорода приходится 6...8 кг массы криогенного сосуда, а по объёмным характеристикам криогенные сосуды соответствуют хранению газообразного водорода под давлением 40 МПа.

По мере проникновения тепла в криогенный сосуд в нём повышается давление. По достижении предельного давления водород

сравливается из сосуда. Поэтому длительное хранение водорода сопровождается его потерями (ежесуточно теряется около 5%). По условиям безопасной эксплуатации криогенного сосуда необходимо, чтобы после достижения максимального рабочего давления в ёмкости газовое пространство составляло не менее 5 %.

Водород в гидридах металлов и интерметаллидов

Металлические сплавы (на базе, например, магния, алюминия или редкоземельных металлов) абсорбируют водород в молекулярные структуры, так что молекулы водорода оказываются плотно упакованными в их кристаллической решётке. При этом выделяется тепло, оно же необходимо при обратном процессе высвобождения водорода из металлогидридов. Главным недостатком таких систем является их большой вес и стоимость материалов.

Наилучшим металлом для хранения водорода является палладий (Pd). В одном объёме палладия может быть «упаковано» почти 850 объёмов водорода. Но перспективность подобного хранилища вызывает сильные сомнения в виду дороговизны этого металла.

Гидрид магния (MgH_2) может запастись до 7,6% массовых долей водорода в кристаллической решётке ($77 \text{ гH}_2/\text{кг}$). Гидрид магния является относительно недорогим, но имеет сравнительно высокую температуру диссоциации $287...297^\circ\text{C}$ и высокие эндотермические потери при дегидрировании соединения (около трети энергии запасённого водорода).

Помимо металлов перспективным является хранение водорода в так называемых «интерметаллических соединениях». Гидрид лантана никеля – $LaNi_5$ – гидрид, в котором одна единица $LaNi_5$ содержит более 6 атомов водорода ($13,4 \text{ гH}_2/\text{кг}$). Десорбция водорода из лантана никеля возможна при комнатных температурах. В единице объёма гидрида лантана-никеля содержится в полтора раза больше водорода, чем в жидком водороде. Однако элементы, входящие в этот интерметаллид, также весьма дорогостоящи.

В реальной практике применяются сложные интерметаллические гидриды, состоящие из трёх и более элементов.

Для нужд автомобильного транспорта создаются гидриды, которые теоретически могут содержать до $130...140 \text{ кг}$ водорода в 1 м^3

металлического гидрида. Однако реализуемая ёмкость гидрида вряд ли будет превышать 80 кг/м^3 .

Наличие в водороде примесей приводит к постепенному ухудшению характеристик хранения. Среди других недостатков – низкая скорость «зарядки» и «разрядки» сосуда, проблемы тепло- и массообмена, высокая теплота образования гидридной фазы, необходимость охлаждения для быстрой заправки и нагрева для быстрого выделения водорода.

Водород в криoadсорбированном виде

Преимущество хранения водорода в криогенно охлаждаемых ёмкостях, содержащих адсорбирующий водород материал, по сравнению с хранением водорода в виде гидридов заключается в том, что количество хранимого водорода на единицу массы адсорбента в случае **криoadсорбции** больше, чем в случае гидридного хранения. К тому же стоимость единицы массы материала адсорбента ниже, чем стоимость единицы массы металлических сплавов, используемых для гидридного хранения водорода.

Чем ниже температура криoadсорбции, тем выше ёмкость адсорбента, что покрывает более высокие расходы на охлаждение водорода. Реальные температуры работы криoadсорбера находятся между $-208\dots-195^\circ\text{C}$. Избыточное давление при адсорбции порядка $4,2 \text{ МПа}$, при десорбции – $0,2 \text{ МПа}$.

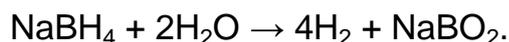
Наилучший адсорбент — активированный уголь низкой плотности с наибольшей эффективной пористостью. Ёмкость хранения водорода в криогенно охлажденном активированном угле достигает 68 г/кг адсорбента при температуре -195°C и возрастает до 82 г/кг при -208°C .

По массовым характеристикам эта система хранения превосходит системы хранения водорода под давлением в баллонах и металлогидридах, но уступает металлогидридным и жидководородным системам по объёмным характеристикам.

Водород в химических гидридах

Химически связанный водород (**химические гидриды**) в некоторой степени подобны металлическим гидридам. Как это следует из названия, водород связан химически в соединение. При взаимодействии

химических гидридов с водой они выделяют водород. Например, рассмотрим боргидрид натрия, NaBH_4 :



Реакция обратима, и получаемый бороксид натрия (NaBO_2) может быть возвращен в исходное состояние боргидрида натрия. NaNH_2 и LiBH_4 – примеры других соединений, которые широко используются для этих целей. Хотя энергетическая плотность химических гидридов высока, тем не менее, существуют проблемы, относящиеся ко всей системе, как технического характера, так и связанные с размерами системы.

Воздействие на состояние окружающей среды

При обращении с водородом требуются повышенные требования безопасности, т.к. водород образует взрывоопасные смеси с воздухом в широком диапазоне концентраций. При этом он горит быстро и создаёт высокую температуру. Однако, учитывая очень низкую относительную плотность водорода (почти в 14 раз легче воздуха), возможные утечки водорода будут быстро рассеиваться в атмосфере.

Экологическая «чистота» водорода как энергоносителя должна рассматриваться по методологии оценки жизненного цикла, т.к. только таким образом можно учесть вклад различных этапов производства, распределения и подготовки к использованию водорода. В работе [115] использовался именно такой подход, который показал, что для условий Калифорнии 2013 года выбросы CO_2 при различных способах производства водорода существенно различаются (табл. 15).

Учитывая данные результаты, Совет по воздушным ресурсам Калифорнии (CARB) законодательно установил целевой показатель доли производства транспортного водорода из возобновляющихся источников энергии (биогаз, получаемый при очистке сточных вод, и «солнечное» электричество) на уровне 46% к концу 2015 года.

При использовании водорода в электромобиле с топливным элементом выбросы ЗВ полностью отсутствуют. Поэтому оценку их «экологичности» необходимо производить по методу жизненного цикла. Как показали исследования первого коммерчески доступного в США автомобиля на водороде Hyundai Tucson Fuel Cell SUV, даже при производстве водорода методом паровой конверсии природного газа,

суммарные выбросы CO₂ в жизненном цикле (англ. *Well-to-wheels* – от источника к колёсам) на 34% меньше, чем у бензинового аналога. Если же принять во внимание законодательную инициативу CARB, то суммарные выбросы CO₂ в жизненном цикле водородного автомобиля оказываются на 60% меньше, чем у бензинового аналога [116].

Таблица 15

Выбросы CO₂ в жизненном цикле производства водорода разными методами

Этапы жизненного цикла (англ. <i>Well-to-tank</i> – от источника к топливному баку) производства готового к заправке в автомобилях водорода	Выбросы CO ₂ , кг/кг H ₂				
	МПК ПГ на локальных установках	МПК ПГ на централизованных установках	МПК биогаза на централизованных установках	Электролиз (электричество из солнечной энергии) на локальных установках	Электролиз (электричество из солнечной энергии) на централизованных установках
Получение природного газа	1,3	1,3	-	-	-
Производство H ₂	11,1	9,8	2	-	-
Транспортировка H ₂ к месту заправки	-	1,9	1,9	-	1,9
Подготовка H ₂ к заправке (сжатие до 20 МПа)	1,8	0,9	0,9	1,8	0,9
Итого	14,2	13,9	4,8	1,8	2,8

Примечание: МПК – метод паровой конверсии.

Использование водорода в качестве топлива для ДВСПВ также обеспечивает близкий к нулевому уровень выбросов ЗВ с ОГ. Так, автомобиль BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel в 2008 году при испытаниях в Аргонской национальной лаборатории (США) продемонстрировал уровень выбросов ЗВ, существенно меньший, чем самые строгие на то время нормы для «автомобиля с супер-ультра низкими выбросами» (англ. *super-ultra low-emission vehicle, SULEV*¹): NO_x – 0,00128 г/км, NMHC – 0,0 г/км, CO – 0,0048 г/км [117].

¹ Нормы SULEV: CO – 1,6 г/км, NO_x – 0,032 г/км, NMHC – 0,016 г/км, HCHO – 0,0064 г/км, PM – 0,016 г/км.

Контрольные вопросы по разделу

1. Перечислите альтернативы бензину и дизельному топливу на автотранспорте.
2. Назовите основные причины необходимости поиска альтернативных автотранспортных топлив.
3. Назовите основные проблемы на пути поиска альтернативных автотранспортных топлив.
4. Чем отличаются биотоплива разных «поколений»?
5. Какие существуют способы получения метана и биометана?
6. Перечислите основные свойства природного газа.
7. Охарактеризуйте особенности использования природного газа в ДВС.
8. Какие существуют технологии хранения природного газа на борту автомобиля? Каковы характеристики этих технологий?
9. Каковы особенности хранения природного газа в адсорбированном виде?
10. Каковы особенности хранения природного газа в сжиженном виде?
11. Какие существуют способы получения сжиженного углеводородного газа?
12. Перечислите основные свойства сжиженного углеводородного газа.
13. Охарактеризуйте особенности использования сжиженного углеводородного газа в ДВС.
14. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования метил-трет-бутилового эфира в ДВС.
15. Каким образом метил-трет-бутиловый эфир воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
16. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования этил-трет-бутилового эфира в ДВС.
17. Каким образом этил-трет-бутиловый эфир воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
18. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования трет-амил-метилового эфира в ДВС.
19. Каким образом трет-амил-метиловый эфир воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
20. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования диизопропилового эфира в ДВС.

21. Каким образом диизопропиловый эфир воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
22. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования метанола в ДВС.
23. Каким образом метанол воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
24. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования этанола в ДВС.
25. Каким образом этанол воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
26. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования трет-бутанола в ДВС.
27. Каким образом трет-бутанол воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
28. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования растительных масел в ДВС.
29. Каким образом растительные масла воздействуют на здоровье людей и состояние окружающей среды?
30. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования метиловых эфиров жирных кислот в ДВС.
31. Каким образом метиловые эфиры жирных кислот воздействуют на здоровье людей и состояние окружающей среды?
32. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования диметилового эфира в ДВС.
33. Каким образом диметиловый эфир воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?
34. Охарактеризуйте способы получения и особенности использования синтетических топлив в ДВС.
35. Каким образом синтетические топлива воздействуют на здоровье людей и состояние окружающей среды?
36. Охарактеризуйте способы получения H_2 . Охарактеризуйте особенности использования H_2 в ДВС. Каким образом H_2 воздействует на здоровье людей и состояние окружающей среды?

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ПРИВодОВ АВТОМОБИЛЕЙ

ДВС – это устройство, преобразующее химическую энергию топлива в механическую работу. Под альтернативными схемами приводов АТС понимают такие, которые содержат в составе энергоустановки альтернативный источник механической работы, полностью или частично заменяющий/дополняющий ДВС.

Автотранспортными средствами с полностью альтернативными источниками механической работы являются:

- батарейный электромобиль (англ. *battery electric vehicle, BEV*) с электродвигателем, питаемым от аккумуляторной батареи и/или суперконденсатора и/или другого химического источника электричества;
- электромобиль с топливными элементами (англ. *fuel cell electric vehicle, FCEV*) с электродвигателем, питаемым от специализированного электрохимического генератора (топливного элемента), напрямую преобразующего химическую энергию топлива в электричество;
- солнцемобиль (англ. *photovoltaic cells electric vehicle, PVCEV*) с электродвигателем, питаемым от фотогальванического элемента, напрямую преобразующего солнечную энергию в электричество.

Автотранспортными средствами с дополнительными накопителями и/или рекуператорами механической энергии электрохимического, маховичного, пневматического или гидравлического типа, используемыми совместно с ДВС, являются:

- гибридный электроавтомобиль (англ. *hybrid electric vehicle, HEV*);
- гибридный маховичный автомобиль (англ. *hybrid flywheel vehicle, HFV*);
- гибридный пневматический автомобиль (англ. *hybrid pneumatic vehicle, HPV*);
- гибридный гидравлический автомобиль (англ. *hybrid hydraulic vehicle, HHV*).

Батарейные электромобили

В батарейном электромобиле (ЭМ) весь запас энергии, необходимый для движения, хранится в батарее аккумуляторов и/или суперконденсаторов и/или других химических источников электричества.

Концептуальная схема привода современного электромобиля показана на рисунке 40 [118]. Привод состоит из трёх основных подсистем: подсистемы электропривода, подсистемы электропитания и подсистемы электропитания вспомогательных устройств.



Рис. 40. Концептуальная схема батарейного электромобиля

Основываясь на информации с датчиков положения педалей акселератора и тормоза, бортовой компьютер формирует управляющий сигнал, подаваемый на электро-конвертер. Функция электро-конвертера заключается в регулировании потоков энергии между источником энергии и электромотором/генератором. Энергия может подаваться от источника энергии к электромотору и далее через механическую трансмиссию к ведущим колёсам (тяговый режим) или, наоборот, передаваться от колёс через трансмиссию к электромотору, который переходит в режим

генератора, и далее через конвертер к источнику энергии для его зарядки (режим рекуперации энергии торможения). Узел управления энергией взаимодействует с бортовым компьютером для обеспечения процесса рекуперации энергии торможения. Также его задачами являются управление процессом зарядки и мониторинг состояния источника энергии.

Подсистема электропитания вспомогательных устройств обеспечивает различное (как правило, более низкое) напряжение, необходимое для их работы.

Специфические характеристики источников тока и электродвигателей определяют особенности компоновки и дизайна ЭМ. В настоящее время наиболее распространёнными схемами являются:

- компоновка с одним или несколькими **центральными электромашинами**;
- компоновка с несколькими **мотор-колёсами**.

При центральном расположении электромашин крутящий момент от неё к колёсам или от колёс к ней (при рекуперативном торможении) передаётся через механическую трансмиссию.

Второй вариант компоновки предусматривает интеграцию электромашин непосредственно в конструкцию ведущих колёс автомобиля. При этом появляются следующие потенциальные преимущества.

Во-первых, отпадает необходимость в трансмиссии – сцеплении, коробке передач, приводных валах и дифференциалах. Это существенно снижает вес, а снижение веса – это дополнительная экономия топлива и снижение выбросов ЗВ. Кроме того, уменьшается стоимость автомобиля и снижаются затраты на его обслуживание и ремонт. Конструкция существенно упрощается, а, как известно, чем проще – тем надежнее. Отсутствие узлов трансмиссии освобождает больше полезного объёма для размещения пассажиров и груза и позволяет конструкторам и дизайнерам шире проявить фантазию.

Во-вторых, управляемые мотор-колёса делают автомобиль чрезвычайно манёвренным, т.к. все колёса могут вращаться с разной скоростью и даже в разных направлениях. Автомобиль способен разворачиваться на 360 градусов, парковаться в самых сложных

условиях и мгновенно адаптироваться к качеству дорожного покрытия.

В-третьих, значительно упрощается конструкция важнейшей для электромобилей системы рекуперации энергии торможения.

В-четвёртых, мотор-колёса позволяют максимально гибко реализовывать любые алгоритмы систем обеспечения активной безопасности движения: ABS, ESP, Traction Control, Brake Assist и т.п.

Главным недостатком мотор-колёс является их большая неподрессоренная масса, что существенно снижает комфорт и управляемость, повышает износ подвески.

Наиболее известной конструкцией, использующей мотор-колёса, является система активных колёс (англ. *active wheel*) французской фирмы Michelin. В данной конструкции в одном узле совмещены тяговый электродвигатель, элементы управления и подвески и тормозной системы. И всё это при общем весе 35 кг, что лишь не намного превышает вес обычного колеса легкового автомобиля. Ключевое место в этой технологии занимает миниатюрный электродвигатель.

Мотор-колесо от Protean Electric имеет очень высокие показатели мощности (110 л.с.) и крутящего момента (800 Нм). И это при весе всего в 31 кг. Protean Drive также превосходит другие конструкции по возможностям рекуперации – до 85% энергии торможения используется для подзарядки батареи.

Электромобили с топливными элементами

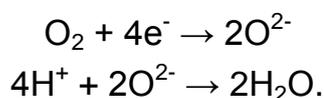
Топливный элемент (ТЭ) – конвертер, преобразующий химическую энергию топлива непосредственно в электроэнергию (и тепло) за счёт окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне.

ТЭ состоит из ионного проводника (электролита) и двух электронных проводников (электродов), находящихся в контакте с электролитом. При работе ТЭ электролит и электроды не расходуются, не претерпевают каких-либо изменений. Топливо и окислитель непрерывно подводятся к электродам – аноду и катоду, продукты химических реакций непрерывно отводятся от них.

Топливный элемент с **протоно-обменной мембраной**¹ (ПОМ) состоит из двух тонких пористых электродов, разделенных твёрдым электролитом в форме тонкой (25...40 мкм) полимерной мембраны (рис. 41). ПОМ играет роль как электролита (для переноса заряда), так и барьера, предотвращающего смешивание водорода с кислородом. Одна из сторон каждого электрода покрыта пористым слоем катализатора на основе платины. Когда атомы водорода поступают в элемент, катализатор на аноде расщепляет их на электроны и протоны



Электроны поступают во внешнюю цепь, образуя электрический ток для питания потребителей, а протоны проходят через мембрану к катоду. Катализатор (платина) на катоде рекомбинирует их с электронами, поступающими из внешней цепи и с кислородом воздуха, в результате чего образуется вода и выделяется тепло



Образующееся тепло необходимо отводить от ячейки с тем, чтобы предотвратить перегрев и дегидратацию (осушение) мембраны.

ПОМ в ТЭ автотранспортного применения изготавливается или из перфторполимеров, например, из материала NafionTM, выпускаемого компанией DuPont, или из полибензимидазола, допированного фосфорной кислотой, например, из материала Celtec, выпускаемого фирмой Kronberg-Celanese AG. Мембраны Celtec более термически стабильны, чем Nafion, и устойчиво работают при температурах 100...200°C, однако их проводимость (особенно при низких температурах) значительно уступает проводимости Nafion.

Имеется целый ряд других органических полимерных мембран, также имеющих свойство быстрого протонного транспорта, однако, несмотря на некоторые их преимущества (более высокая термическая устойчивость, сравнительная дешевизна, меньшая газопроницаемость), они являются гораздо менее изученными и применяющимися материалами. На рынке предлагаются мембраны на основе сульфотрированного полистирола (мембраны BAM3G фирмы Ballard

¹ Иногда называются – полимерные электролитические мембраны (ПЭМ).

Advanced Materials Corporation) и сходных с ним полимеров. Все мембраны подобного типа обладают одним принципиальным недостатком – отсутствием собственных подвижных протонов, в связи с чем весь протонный транспорт осуществляется по водным конгломератам, абсорбированным внутри полимера, и, как следствие, очень сильной зависимостью электрохимических свойств от влажности и температуры.

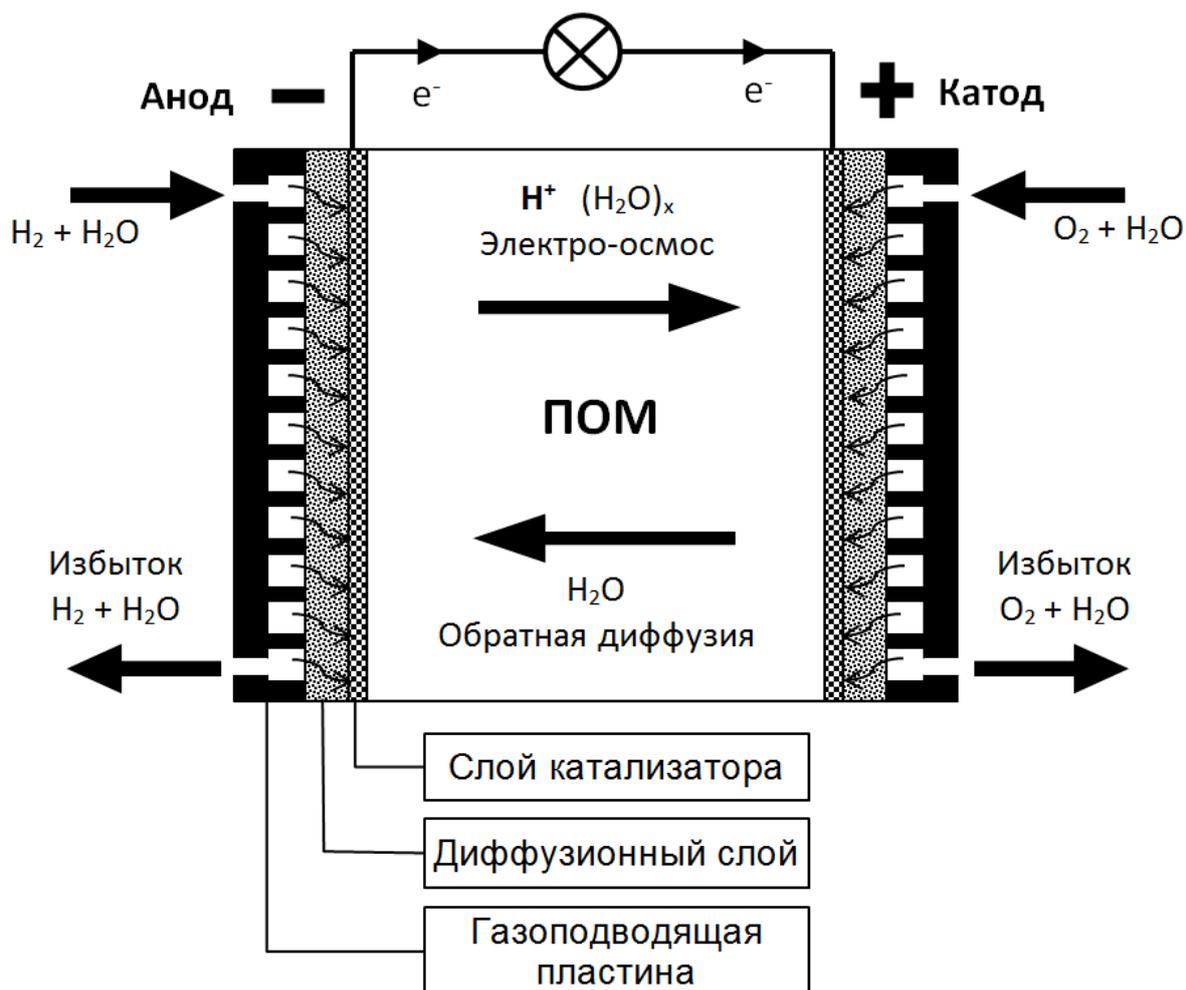


Рис. 41. Схема функционирования топливного элемента с ПОМ

Скорости приведённых выше реакций пропорциональны силе тока во внешней цепи. Ток возникает из-за появления ЭДС между анодом и катодом, которая теоретически может достигать значения 1,2 В. Реальные конструкции ячеек создают напряжение 0,3...0,8 В и имеют удельную мощность порядка 1 Вт/см². Для получения более высокого напряжения необходимое количество топливных ячеек объединяют в

батарею.

ПОМ обеспечивает высокую плотность тока, что позволяет уменьшать вес и объём ТЭ, а также упрощает герметизацию в процессе производства, уменьшает коррозию, и обеспечивает более долгий срок службы ТЭ. ТЭ с ПОМ имеют высокий КПД (40...60%), работают при низких температурах (50...100°C), что ускоряет запуск и реакцию на изменения потребности в электричестве. Однако ТЭ, в силу низкой скорости химических реакций, обладают некоторой инертностью и для работы в условиях пиковых или импульсных нагрузок требуют определённого запаса мощности или применения других технических решений, например включения в состав энергоустановки суперконденсаторов или аккумуляторных батарей.

Прохождение протонов через мембрану возможно только в случае её достаточной влажности (95% отн.). Для поддержания влажности мембраны входящие газы должны иметь достаточную относительную влажность. С другой стороны, избыточная вода «затопляет» поры диффузионного слоя и слоя катализатора, «тормозя» протекающие процессы и ухудшая производительность ячейки.

При наличии тока во внешней цепи протоны проходят через мембрану, окружённые несколькими молекулами воды, что приводит к их «перетягиванию» через мембрану от анода к катоду. Этот процесс называется «электро-осмосом». Благодаря ему, а также процессу электрохимического формирования воды, на катоде образуется избыточное количество воды. Это, в свою очередь, формирует градиент концентрации воды между катодом и анодом, что приводит к возникновению «обратной диффузии» молекул воды от катода к аноду. При малой плотности тока «обратная диффузия» превосходит «электро-осмос», поддерживая необходимую влажность мембраны, однако при высокой плотности тока «электро-осмос» превосходит «обратную диффузию», что приводит к чрезмерному осушению мембраны и резкому увеличению внутреннего сопротивления ячейки. Кроме того, осушение мембраны может привести к её быстрому разрушению (расслоению или перфорации). Поэтому необходимо постоянное отслеживание влажности мембраны и обеспечение мер по её поддержанию в заданных пределах. Меры включают в себя управление массовым расходом и влажностью

подаваемых реагентов, а также управление температурой и давлением реагентов внутри ячейки [119].

Для ТЭ нужен очень чистый водород. Он не должен содержать CO и сероводород даже в следовых количествах (не более 10 млн^{-1}), т.к. эти вещества отравляют катализатор.

Совершенствование ТЭ ведётся не только в направлении повышения активности катализатора, но и в направлении создания более стабильных и долговечных материалов, устранения побочных реакций, ведущих к загрязнению мембраны, обеспечения стойкости к отрицательным температурам. Мембраны с нанотекстурированными поверхностями существенно увеличивают площадь поверхности катализатора. Ведутся работы и по созданию катализаторов на основе менее дорогих металлов, например никеля, кобальта, титана и хрома, и их использования в форме тонкодисперсных частиц, внедрённых в пористую композитную структуру, а также катализаторов на основе металл-органических молекулярных каркасных структур (англ. *metal-organic frameworks, MOF*).

Солнцемобили

Солнцемобилем называют электромобиль, оснащённый фотоэлектрическими панелями (солнечными батареями), используемыми для зарядки бортового накопителя энергии. Как правило, солнцемобили, заряжаемые исключительно от солнечных батарей, имеют либо спортивно-исследовательское, либо рекреационное назначение. Некоторые серийно выпускаемые электромобили или гибриды могут опционально оснащаться солнечной батареей либо для подзарядки бортового накопителя энергии, либо для обеспечения автономного питания дополнительных потребителей энергии, например, системы климат-контроля.

Малая полезная поверхность для размещения солнечных батарей на автомобиле, их невысокий КПД (максимум лишь 10...12% у тонкоплёночных фотоэлементов), зависимость от времени суток и погодных условий, невозможность оптимальной ориентации панелей в пространстве, быстрое загрязнение поверхности – основные проблемы, связанные с использованием солнечных батарей на борту

солнцемобилей. Кроме того, срок службы солнечных батарей составляет примерно 30 лет, что превышает средний срок службы автомобилей¹.

Использование солнечных батарей в стационарном исполнении позволяет существенно более эффективно преобразовывать энергию света в электроэнергию. КПД многослойных фотогальванических панелей, используемых совместно с гелиоконцентратором, достигает 41,8% [120]. Поэтому представляется более целесообразным использовать стационарные гелиоустановки для зарядки электромобилей или подключаемых гибридов.

Гибридные автотранспортные средства

Традиционные автомобили с ДВС обладают хорошими динамическими характеристиками и большим запасом хода, однако, низкой эффективностью и неудовлетворительным уровнем выбросов ЗВ. Низкая эффективность автомобилей с ДВС обуславливается рядом причин:

- низким КПД собственно ДВС, особенно на режимах малых нагрузок и холостого хода;
- преобладанием режимов малой нагрузки и холостого хода в условиях городского движения;
- невозполнимыми потерями энергии при торможении (кинетическая энергия рассеивается в тепло);
- низким КПД гидротрансформатора на режимах трогания автомобиля с места (для автомобилей с гидродинамической автоматической коробкой передач).

С другой стороны, существуют варианты приводов с высокой эффективностью, нулевыми выбросами, однако с неприемлемо низким

¹ При изготовлении тонкоплёночных фотоэлементов чаще всего используют аморфный кремний, сульфид/теллурид кадмия, медно-галлиевые и медно-индиевые диселениды. КПД медно-индий-галлиевых батарей может достигать 20%. Но пока доля подобных элементов на рынке тонких солнечных плёнок невелика (порядка 2%). Более распространены плёнки на базе кадмия теллурида (порядка 18%, КПД до 16%). Очень востребованы и аморфно-кремниевые батареи, КПД которых удалось повысить до 10%.

запасом хода. Попытка объединения ДВС с такими высокоэффективными приводами получила название гибридного (комбинированного) привода.

К гибридным автомобилям относятся такие, которые помимо системы «топливо + ДВС» имеют на борту ещё одну или несколько систем энергообеспечения:

- «аккумуляторная батарея + электромашинa»;
- «топливный элемент + электромашинa»;
- «суперконденсатор + электромашинa»;
- «маховик»;
- «маховик + электромашинa»;
- «жидкость под давлением + гидромашинa»;
- «воздух под давлением + пневмомашинa»;
- «пружина» и т.п.

Это позволяет использовать преимущества разных систем и компенсировать их недостатки.

В гибридном приводе возможны различные варианты потоков энергии (рис. 42) [118]:

- 1) энергопривод №1 в одиночку подаёт энергию для преодоления нагрузки;
- 2) энергопривод №2 в одиночку подаёт энергию для преодоления нагрузки;
- 3) энергопривод №1 и энергопривод №2 одновременно подают энергию для преодоления нагрузки;
- 4) энергопривод №2 получает энергию от нагрузки (рекуперация);
- 5) энергопривод №2 получает энергию от энергопривода №1;
- 6) энергопривод №2 получает энергию одновременно от энергопривода №1 и нагрузки;
- 7) энергопривод №1 подаёт энергию одновременно для преодоления нагрузки и для восполнения запаса энергии источника №2 через преобразователь №2;
- 8) энергопривод №1 подаёт энергию на энергопривод №2, который, в свою очередь, подаёт энергию для преодоления нагрузки;
- 9) энергопривод №1 подаёт энергию для преодоления нагрузки, а энергопривод №2 получает энергию от нагрузки.

В случае электрогибрида вариант (1) – это движение автомобиля

только на тяге, создаваемой ДВС. Такой вариант возможен в случае, если аккумуляторная батарея полностью разряжена, а мощности ДВС хватает только на обеспечение движения автомобиля, или в случае, если аккумуляторная батарея полностью заряжена, а для обеспечения движения автомобиля достаточно мощности одного ДВС.

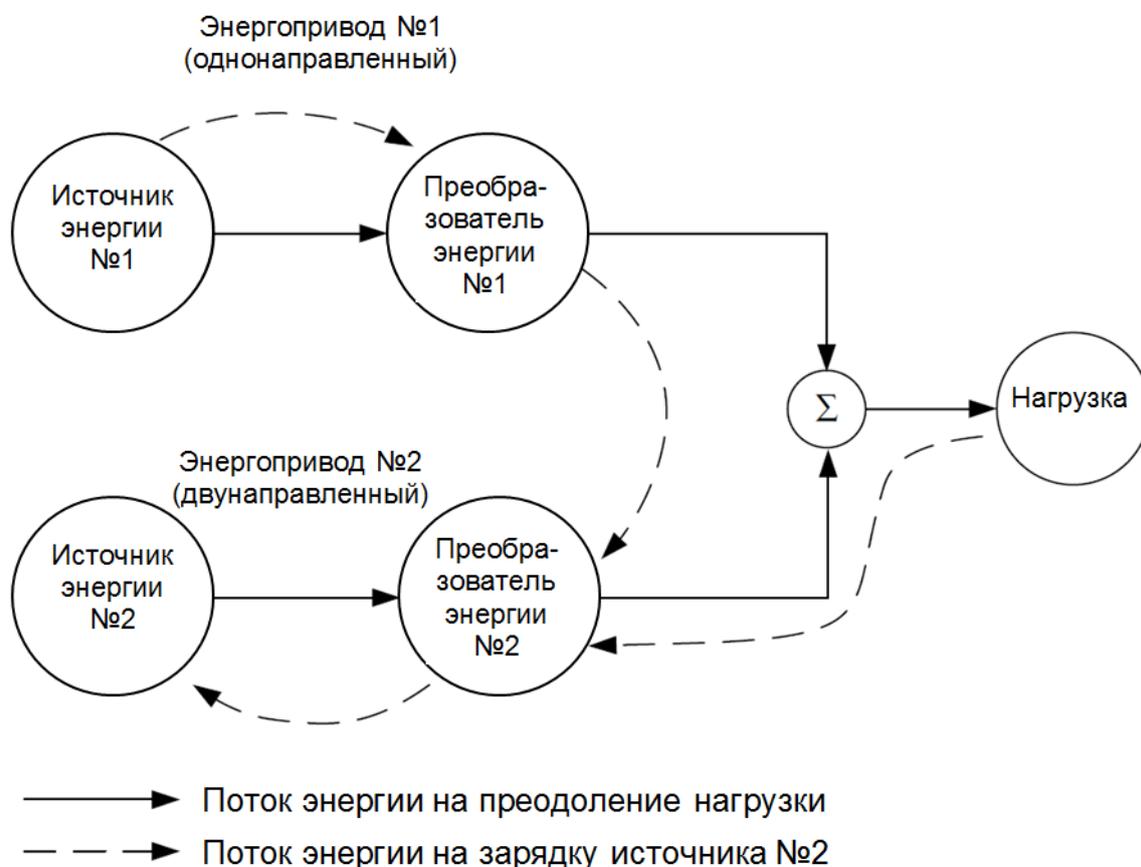


Рис. 42. Концептуальная схема гибридного привода

Вариант (2) – это чисто электромобильный режим движения, когда ДВС выключен из соображений устранения режимов работы с низкой эффективностью (например, при движении с очень малой скоростью), или полного предотвращения выбросов ЗВ.

Вариант (3) – это гибридный режим движения, который может использоваться в случаях, когда требуется быстрое ускорение или преодоление крутого подъёма.

Вариант (4) – это режим рекуперативного торможения, во время которого кинетическая или потенциальная энергия автомобиля трансформируется в электрическую энергию и подаётся для зарядки аккумуляторной батареи.

Вариант (5) – это зарядка аккумуляторной батареи от ДВС при остановке, выбеге или движении автомобиля под небольшой уклон.

Вариант (6) – это режим, при котором зарядка аккумуляторной батареи осуществляется одновременно и от ДВС, и от рекуперативного торможения.

Вариант (7) – это режим, при котором ДВС одновременно обеспечивает движение автомобиля (как правило, с небольшой скоростью) и зарядку аккумуляторной батареи.

Вариант (8), при котором ДВС заряжает аккумуляторную батарею, энергия из которой, в свою очередь, питает электромотор, обеспечивающий движение автомобиля. Этот режим характерен для последовательной схемы гибридного привода или электромобиля с «увеличителем пробега» в виде ДВС.

Вариант (9) – это модификация варианта (7) в конструкциях, где ДВС и электромотор отдельно приводят переднюю и заднюю ось и не связаны друг с другом механически.

В реальных условиях мощность сопротивления движению автомобиля постоянно изменяется из-за хаотически чередующихся режимов разгона, равномерного движения, торможения, движения в гору и под уклон и т.п. Рассматривая изменение мощности сопротивления движению автомобиля за определённый фиксированный интервал времени (ездовой цикл), её можно разложить (декомпозировать) на две составляющие: постоянную (среднюю) и изменяющуюся (динамическую). Причём среднее значение динамической мощности за рассматриваемый промежуток времени равно нулю (рис. 43).

В гибридных автомобилях один из энергоприводов, обладающий лучшими стационарными характеристиками, например, ДВС или топливный элемент, может использоваться для обеспечения постоянной средней мощности. Поскольку средняя мощность существенно меньше максимальной (пиковой) мощности в ездовом цикле, то для её выработки требуется значительно менее мощный преобразователь энергии (ДВС и т.п.).



Рис. 43. Декомпозиция мощности сопротивления движению автомобиля на среднюю и динамическую составляющие

С другой стороны, энергопривод, обладающий лучшими нестационарными характеристиками, например, «электродвигатель + суперконденсатор» или маховик, обеспечивает динамическую составляющую мощности. Поскольку среднее значение динамической мощности в ездовом цикле равно нулю, запас энергии в «динамическом» энергоприводе в начале и конце ездового цикла одинаков (т.е. сколько энергии было затрачено на преодоление динамической части сопротивления, столько же и вернулось в результате рекуперации). Другими словами, динамический энергопривод выполняет функции буфера энергии. При этом требования к ёмкости накопителя энергии существенно снижаются.

Существующие конструкции гибридных приводов можно разделить по их конфигурации на:

- последовательные,
- параллельные,
- с разделением потока мощности ДВС.

По относительной доле альтернативного привода в мощностном балансе движения автомобиля различают:

- лёгкие гибриды (мощность альтернативного привода – до 15% от общей мощности привода),
- средние гибриды (мощность альтернативного привода – до 50% от общей мощности привода),
- полные гибриды (мощность альтернативного привода – более 50% от общей мощности привода).

Основным преимуществом гибридных автомобилей является уменьшение на 30...60% расхода топлива и выбросов ЗВ для городских условий движения, что достигается за счёт:

- устранения нежелательных с точки зрения экономичности или токсичности ОГ режимов работы ДВС;
- рекуперации энергии торможения;
- уменьшения требуемой максимальной мощности ДВС;
- возможности отключения ДВС при кратковременных остановках или при движении с малой скоростью.

Недостатками гибридных автомобилей являются:

- увеличение массы автомобиля;
- увеличение сложности конструкции и цены.

Гибридные электроавтомобили

Последовательная конфигурация

В последовательном гибридном приводе ДВС, работая на постоянном режиме, вращает генератор эквивалентной мощности. Электроэнергия, вырабатываемая генератором, подаётся на электромотор, вращающий колёса, а также на аккумуляторную батарею, производя её зарядку. В определённые моменты для питания электромотора используется только аккумуляторная батарея – в этом случае гибрид работает как электромобиль. При рекуперативном торможении электромотор переходит в режим генератора, создавая тормозной момент и вырабатывая электроэнергию, подаваемую к аккумуляторной батарее для её зарядки (рис. 44) [118].

Основным преимуществом последовательного гибридного привода является возможность фиксировать рабочую точку двигателя на режиме наилучшей экономичности/экологичности. Более того, характеристики ДВС на этом режиме можно дополнительно улучшить за счёт оптимизации рабочего процесса, т.к. отпадает необходимость в компромиссных настройках для обеспечения приемлемых характеристик на остальных режимах работы ДВС. Последовательная схема позволяет использовать более эффективные, но способные работать только на одном стационарном режиме типы ДВС, например, газовые турбины.

Вторым преимуществом последовательного гибридного привода

является возможность существенного упрощения механической трансмиссии. Тяговый электромотор-генератор (ТЭМ-Г) обладает «идеальной» тяговой характеристикой, поэтому отпадает необходимость в использовании многоступенчатой коробки передач. В случае же использования двух (или нескольких) ТЭМ-Г, встроенных в колёса, необходимость в механической трансмиссии отпадает полностью. Более того, такая схема со всеми ведущими мотор-колёсами обеспечивает возможность гибкого автономного управления силой тяги на каждом колесе, что повышает управляемость и проходимость автомобиля.

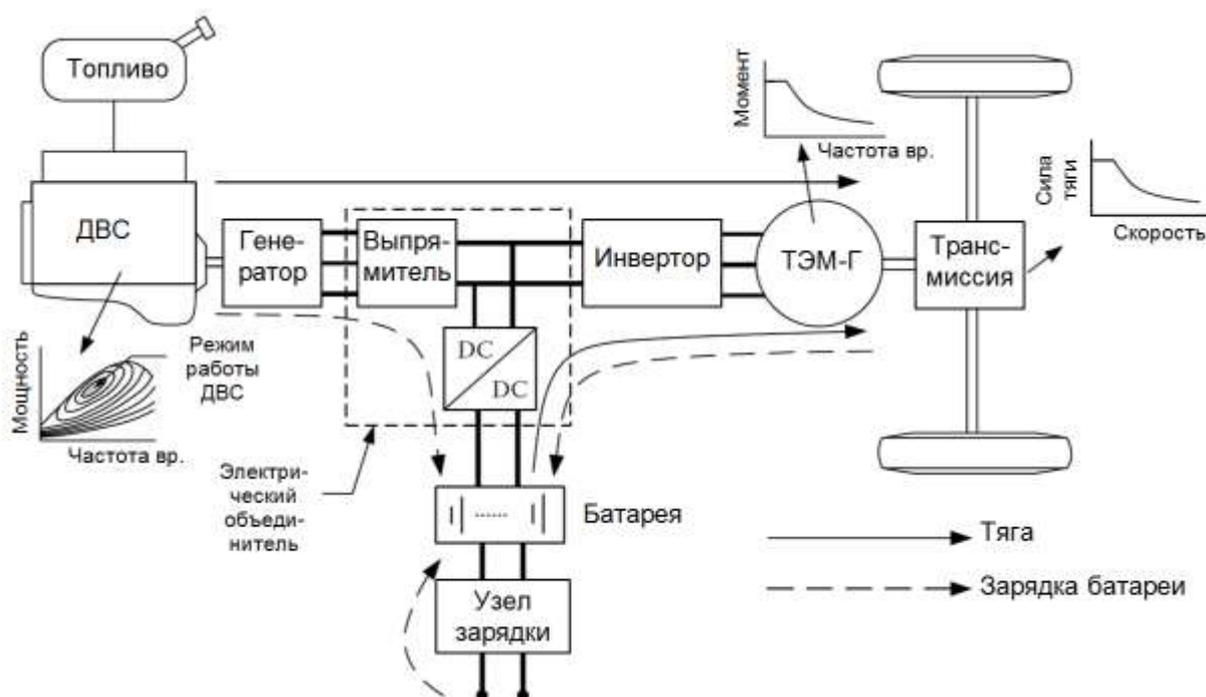


Рис. 44. Конфигурация последовательного электрогибридного привода

Наконец, третьим преимуществом последовательной схемы является полностью электронное управление всеми режимами движения, что реализуется существенно проще, чем механическое или электро-механическое управление.

Однако этой компоновке присущи и недостатки:

- большие потери при преобразовании энергии из одного вида в другой;
- наличие отдельного генератора;
- необходимость использования мощного ТЭМ-Г.

На практике такая схема применяется либо если мощности ДВС и генератора относительно малы по сравнению с мощностью электромотора (например, в городских автобусах), либо если ДВС и генератор используются лишь периодически, в качестве «увеличителя запаса хода» электромобиля.

Параллельная конфигурация

В параллельном гибридном приводе, как и в обычном автомобиле, механическая энергия от ДВС передается через трансмиссию на ведущую ось. Однако эта энергия может быть дополнена механической энергией, вырабатываемой тяговым электромотором-генератором. Управление потоками мощности происходит в механическом объединителе. Через него происходит передача суммарной мощности от ДВС и ТЭМ-Г к колёсам, через него ДВС вращает ТЭМ-Г, вырабатывающий электроэнергию для зарядки батареи, через него энергия от колёс подаётся на ТЭМ-Г при рекуперативном торможении (рис. 45) [118].

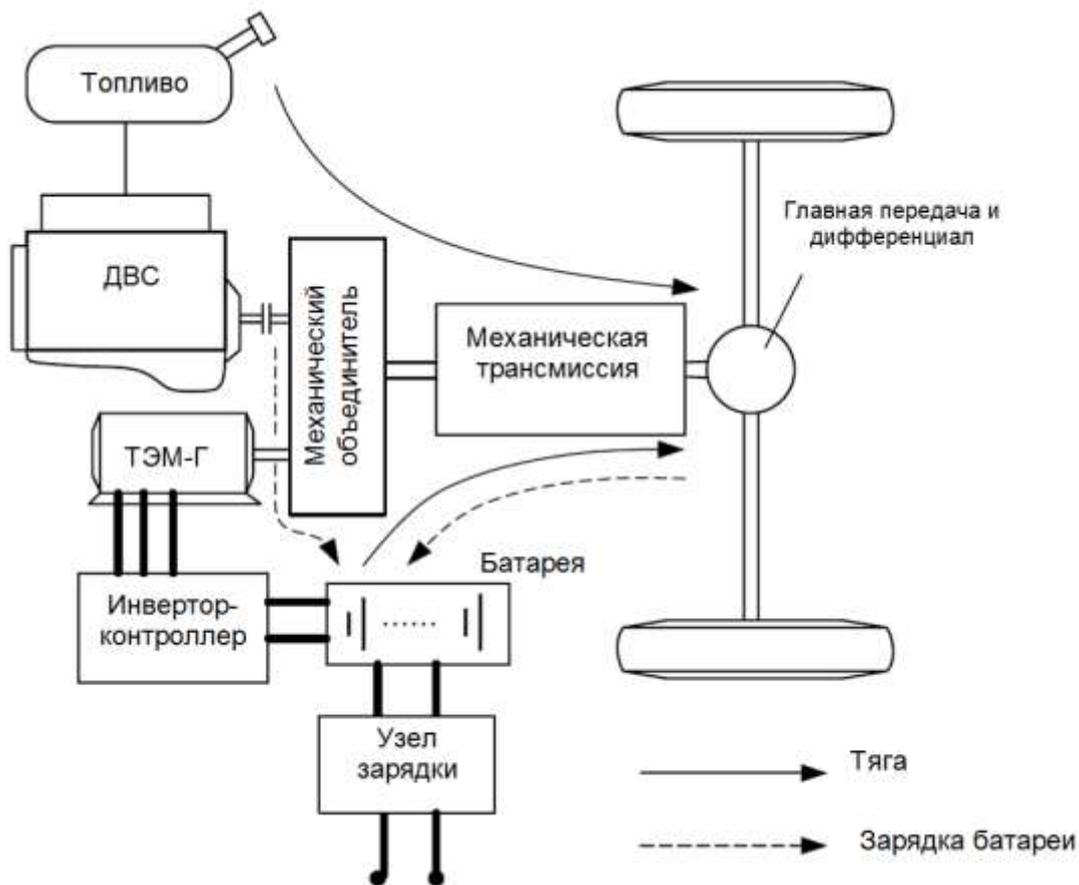


Рис. 45. Конфигурация параллельного электрогибридного привода

К преимуществам параллельного привода можно отнести:

- меньшие потери энергии из-за наличия механической связи агрегатов с ведущими колёсами;
- меньшие габариты и масса агрегатов, т.к. их мощности суммируются, а также отсутствие отдельного генератора.

К недостаткам параллельного привода относятся:

- невозможность фиксации режима работы ДВС;
- сложность конструкции механического объединителя;
- сложность управления режимами работы привода.

Параллельный гибридный привод может быть исполнен в нескольких конфигурациях: двухосной, одноосной (или соосной) и разделённой. Кроме того, существует множество конструкций механических объединителей: зубчатых, клиноременных, планетарных.

Большое распространение получили соосные параллельные конфигурации гибридного привода с устройством, которое получило название «интегрированный стартер-генератор» – ИСГ. Это устройство устанавливается между двигателем и коробкой передач (вместо маховика или на первичном валу коробки передач). ИСГ заменяет традиционные стартер и генератор, а также выполняет все функции ТЭМ-Г в лёгких и средних гибридах.

Конфигурация с разделением потока мощности ДВС

Данная конфигурация представляет собой смесь последовательной и параллельной схем. Как правило, большая часть мощности ДВС передаётся к ведущим колёсам через механическую трансмиссию. Небольшая часть, однако, через устройство отбора мощности поступает к генератору, который заряжает аккумуляторную батарею и питает ТЭМ-Г, механическая мощность от которого передаётся через механический объединитель к ведущим колёсам (рис. 46) [118].

Такая конфигурация применяется в лёгких гибридах на базе грузовых автомобилей для улучшения их энергоэффективности.

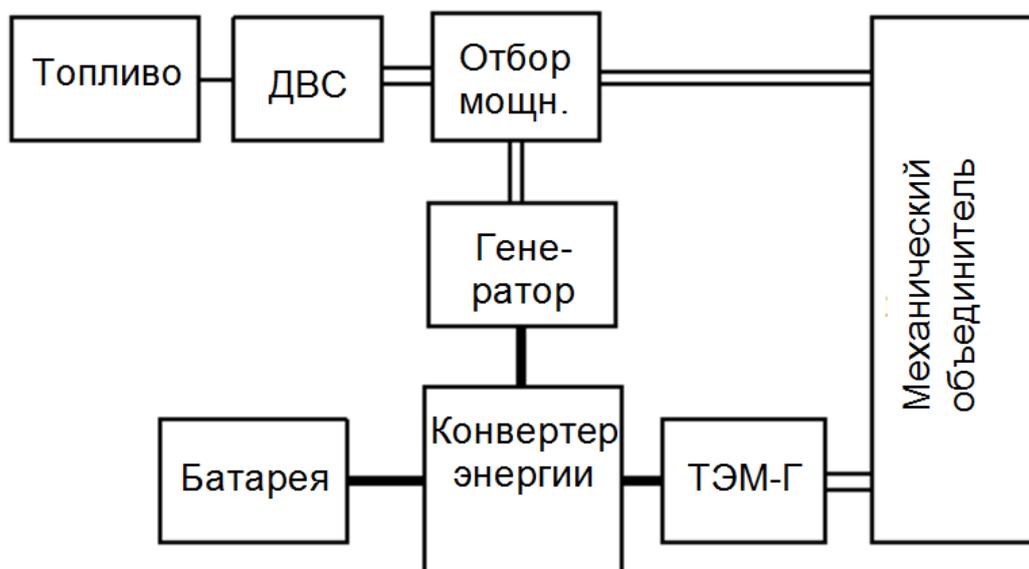


Рис. 46. Конфигурация электрогибридного привода с разделением потока мощности ДВС

Гибридные гидравлические автомобили

Гидравлическая подсистема гибридного привода состоит из двух ключевых элементов: гидроаккумулятора и гидравлического мотора/насоса, а также из ряда вспомогательных узлов и деталей: ёмкости низкого давления для хранения гидравлической жидкости, трубопроводов, гидрораспределителей и т.п.

Гидромотор/насос используется для взаимного преобразования энергии из механической формы в гидравлическую и наоборот. Как правило, применяются аксиально-плунжерные гидромашины способные обеспечивать высокие скорости вращения вала. Выпускают аксиально-плунжерные гидромашины с наклонным диском (шайбой) и с наклонным блоком цилиндров (рис. 47) [121].

Гидромашины с наклонным блоком цилиндров обеспечивают лучшую эффективность, поэтому более привлекательны для использования в гидрогибридных автомобилях. При этом в гидромашине с регулируемым наклонным блоком можно изменять рабочий объём в диапазоне 0...100% рабочего объёма машины и тем самым регулировать производительность насоса (объём подачи масла) или производительность мотора – скорость вращения и момент на валу.

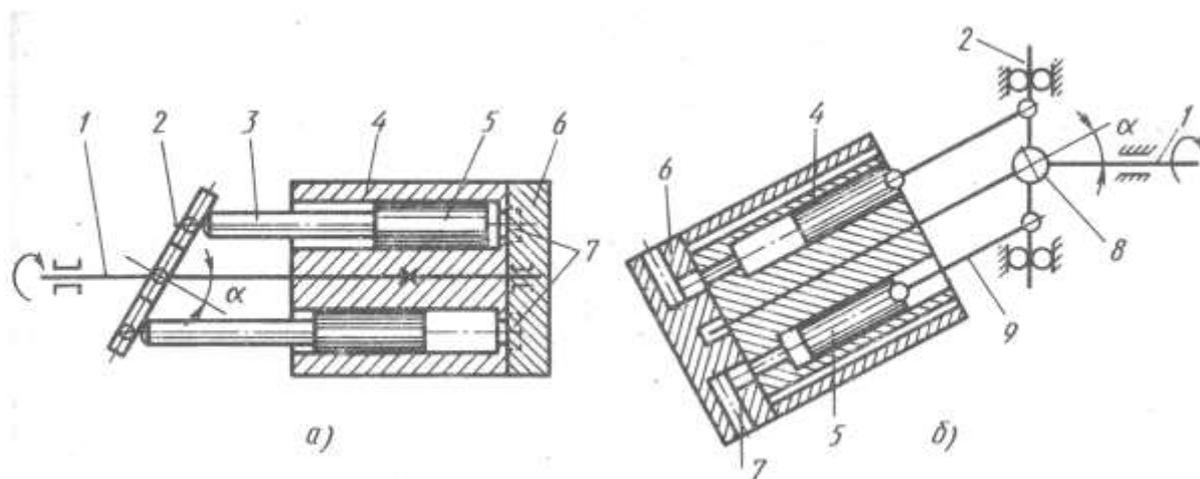


Рис. 47. Принципиальные схемы аксиально-поршневых гидромашин: а — с наклонным диском, б — с наклонным блоком цилиндров; 1) – ведущий вал, 2) – диск, 3) – шток, 4) – блок цилиндров, 5) – поршень, 6) – гидрораспределитель, 7) – пазы, 8) – шарнир, 9) – шатун

К преимуществам гидромашин относятся:

- меньшие размеры (в среднем в 3 раза) и масса¹ (в среднем в 15 раз), чем у электромашин соответствующей мощности;
- время запуска и разгона гидромашин составляет доли секунды, что для электромашин большой мощности (несколько киловатт) недостижимо;
- для гидромашин не представляют опасности частые включения-выключения, остановки и реверс;
- закон движения вала гидромашин может легко изменяться путём использования средств регулирования гидропривода;
- обеспечивается самосмазываемость трущихся поверхностей при применении минеральных и синтетических масел в качестве рабочих жидкостей.

К недостаткам гидромашин относятся:

- утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, особенно при высоких значениях давления в гидросистеме;
- большие пульсации подачи (для насосов) и расхода (для гидромотора)

¹ Масса гидромашинной производительностью 110 см³/об для последовательного гибрида Ford Expedition SUV составляет порядка 37 кг.

и, как следствие, большие пульсации давления в гидросистеме;

- зависимость вязкости рабочей жидкости, а значит и рабочих параметров гидропривода, от температуры окружающей среды;
- сложность конструкции и высокая стоимость данного типа гидромашин.

Гидроаккумулятор – это сосуд, работающий под давлением, который позволяет накапливать энергию сжатого газа (как правило, азота) или пружины и передавать её в гидросистему потоком жидкости, находящейся под давлением. Наиболее широкое применение на практике получили пневмогидравлические аккумуляторы. Поэтому гидравлические гибриды иногда ошибочно относят к пневматическим (например, гибрид PSA Hybrid Air по сути является гидрогибридом).

Гидроаккумуляторы могут быть двух типов: с газовым пузырьём и с поршнем (рис. 48) [122].

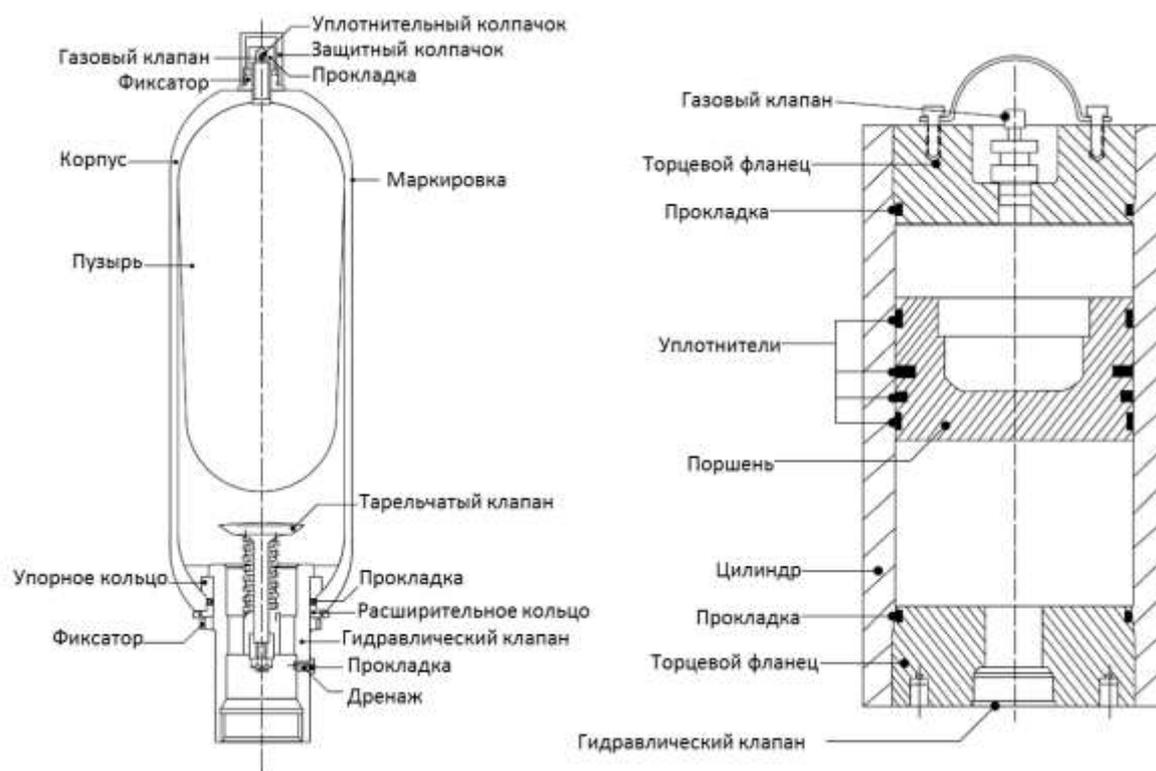


Рис. 48. Схемы гидроаккумуляторов, использующихся в гидрогибридных автомобилях. Слева – конструкция с газовым пузырьём, справа – конструкция с поршнем

Конструкции с газовым пузырьём более эффективны (КПД $\approx 70\%$), но требуют периодического пополнения газового заряда, т.к. происходит его

просачивание через оболочку пузыря. При периодическом изменении давления внутри газового пузыря изменяется и температура газа. Для повышения эффективности гидроаккумуляторов, внутренний (газовый) объём пузыря заполняют полиуретановой теплоаккумулирующей насадкой («пенной»).

Гидропривод гибридного автомобиля работает под давлением 34,5 МПа. Максимально допустимое давление – 48,3 МПа. Гидроаккумуляторы рассчитаны на предельное разрушающее давление 105 МПа. Масса 60-литрового гидроаккумулятора с пузырём составляет порядка 38 кг (плюс 7,5 кг азота, плюс 5,2 кг полиуретановой насадки).

Кроме гидроаккумулятора в состав гибридного гидропривода входит сосуд низкого давления для хранения гидравлической жидкости (рис. 49). Рабочее давление для данного сосуда составляет 1,4 МПа, а предельное разрушающее давление – 7 МПа. Масса 60-литрового сосуда с пузырём составляет порядка 13 кг (плюс 0,3 кг азота, плюс 5,2 кг полиуретановой насадки).

Трубопроводы высокого давления имеют удельную массу порядка 2,2 кг/м, а трубопроводы низкого давления – 1,2 кг/м.

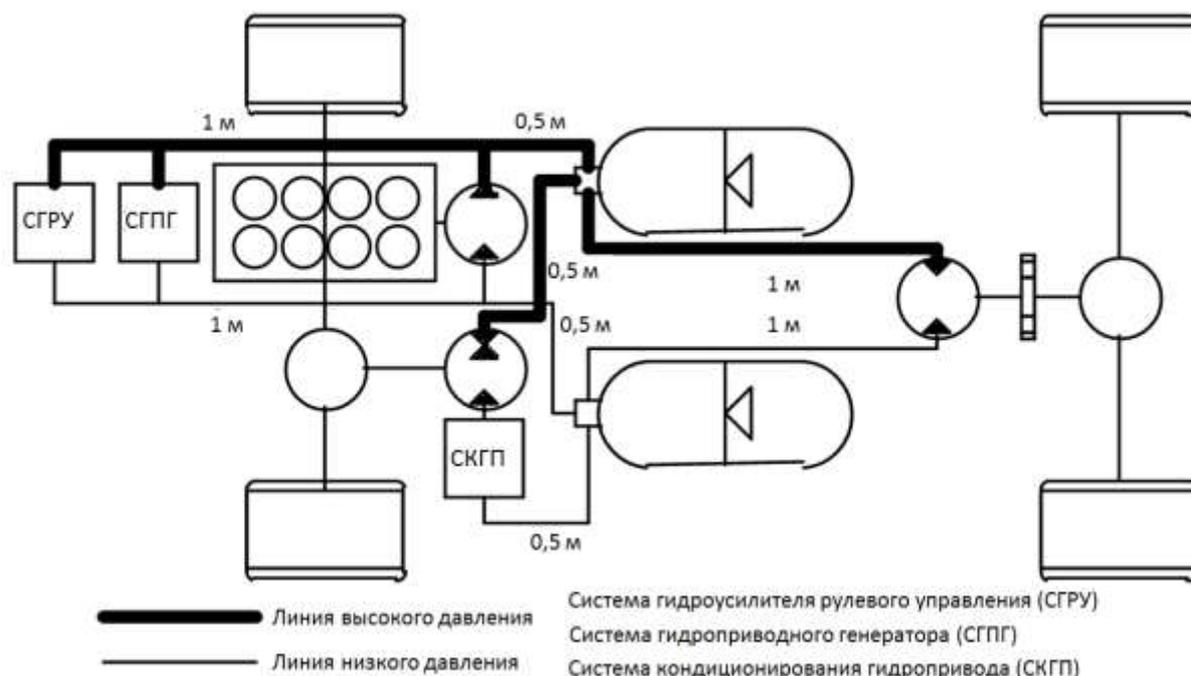


Рис. 49. Схема привода полного последовательного гидрогибрида Ford Expedition SUV

Поскольку гидрогибридный автомобиль может часть времени двигаться с выключенным ДВС, необходимо предусмотреть меры по сохранению электропитания бортовых потребителей. Для этой цели используют аккумуляторную батарею повышенной ёмкости (на 20...25% для лёгких и средних гибридов) или генератор с гидравлическим приводом (для полных гибридов).

Существующие модели демонстрируют улучшение топливной экономичности в городских условиях на 20...30% для параллельных средних гибридов и 60...70% для полных последовательных гибридов. Усложнение конструкции окупается за 2...3 года эксплуатации [123].

Гибридные пневматические автомобили

В принципе, заменив гидромашину на пневмомашину (поршневого или роторного типа) и гидроаккумулятор на баллон со сжатым воздухом, из гидравлического гибрида можно получить пневматический гибрид. Однако сжатый воздух имеет низкую энергетическую плотность, а пневмомшины – увеличенные массу и габариты по сравнению с гидромашинами. Поэтому широкого применения такая схема не находит.

Более перспективным решением является конструктивное объединение ДВС с пневмомашинной или, наоборот, тяговой пневмомшины (пневмодвигателя) с устройством утилизации химической энергии углеводородного топлива.

Двигатель Scuderi

Преимуществом первого варианта является отсутствие необходимости установки вспомогательной пневмомшины. Вместо этого используется модифицированный вариант обычного четырехтактного ДВС, получивший название «двигателя с разделённым циклом». Если в обычном четырёхтактном ДВС все четыре такта: впуск, сжатие, рабочий ход и выпуск, осуществляются в каждом из цилиндров, то в «двигателе с разделённым циклом» такты распределяются между парой взаимосвязанных цилиндров (рис. 50) [124].

В одном из них – компрессионном (1) – происходит впуск и сжатие воздуха, а во втором – силовом (6) – рабочий ход и выпуск. Сжатый воздух может поступать из компрессионного цилиндра или в силовой

цилиндр через перепускной канал (2) и систему клапанов, или в воздушный резервуар (5) через трубопровод (4) с клапаном (3).

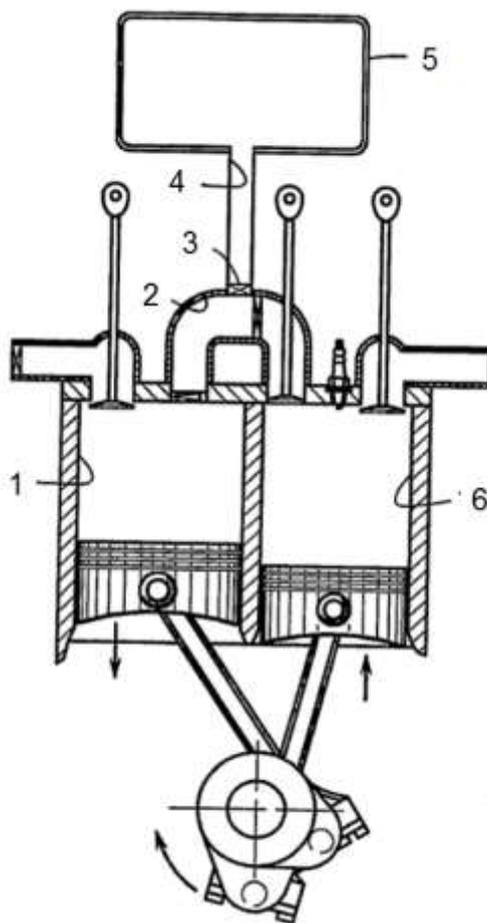


Рис. 50. Схема работы пневмогибридной силовой установки на основе «двигателя с разделённым циклом» Scuderi

Силовой цилиндр и выполнен с возможностью избирательного управления, чтобы переводить его или в рабочий режим или в холостой режим. Цилиндр сжатия также выполнен с возможностью избирательного управления, чтобы переводить его или в режим сжатия, или в холостой режим. Воздушный резервуар, введенный между цилиндром сжатия и силовым цилиндром, избирательно действует или для приёма сжатого воздуха из цилиндра сжатия, или для подачи сжатого воздуха в силовой цилиндр, для использования в передаче мощности на коленчатый вал двигателя.

Двигатель выполнен с возможностью работы в четырёх режимах:

- в режиме двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
- в режиме воздушного компрессора (ВК);

- в гибридном режиме одновременного заполнения воздушного резервуара и передачи мощности от сгораемого топлива на коленчатый вал (ДВС+ВК) или
- в режиме использования предварительно накопленной энергии сжатого воздуха, т.е. в режиме пневматического мотора (ПМ).

В ДВС-режиме оба цилиндра находятся соответственно в режиме сжатия и в рабочем режиме. Поршень сжатия всасывает и сжимает входной воздух для использования в силовом цилиндре. Сжатый воздух поступает в начале рабочего такта в силовой цилиндр вместе с топливом, которое воспламеняется, сгорает и расширяется в этом же рабочем такте силового поршня, передавая мощность на коленчатый вал. Продукты сгорания выталкиваются из силового цилиндра на такте выпуска. Рабочий процесс отличается от реализуемого в цикле Отто, т.к. предварительно сжатый (и нагретый) в компрессионном цилиндре воздух с большой скоростью поступает в силовой цилиндр, одновременно смешиваясь с впрыскиваемым топливом. И только после закрытия перепускного клапана рабочая смесь воспламеняется. Рассмотрение особенностей данного рабочего процесса не входит в задачи данного учебного пособия.

В ВК-режиме цилиндр сжатия находится в режиме сжатия, т.е. всасывает и сжимает воздух, который подаётся в накопительный резервуар, повышая в нём давление. Силовой цилиндр при этом находится в холостом режиме, т.е. оба клапана закрыты, топливо не подаётся, и свеча зажигания не работает. Данный режим реализуется при торможении двигателем, позволяя обеспечивать рекуперацию кинетической энергии торможения.

В ДВС+ВК-режиме сжатый в компрессионном цилиндре воздух одновременно поступает и в силовой цилиндр, и в воздушный резервуар. Этот режим используется для дополнительной «загрузки» силового цилиндра, т.е. вывода двигателя из неэффективной области низких нагрузок в более эффективную зону средних нагрузок.

В ПМ-режиме силовой цилиндр находится в рабочем режиме и получает из резервуара сжатый воздух, который расширяется в рабочем такте силового цилиндра, передавая мощность на коленчатый вал. Расширенный воздух выпускают в такте выпуска, при этом цилиндр

сжатия находится в холостом режиме, т.е. оба клапана закрыты. Данный режим используется для движения автомобиля в режиме «без выбросов».

Описанная конструкция запатентована американской фирмой Scuderi, которая в 2009 году представила работающий образец. В настоящее время проводятся исследования по доводке конструкции. Основываясь на результатах компьютерного моделирования, в Scuderi утверждают, что реальный двигатель обеспечит прирост топливной экономичности в 15...30% по сравнению с обычными бензиновыми моторами, а кроме того, за счёт снижения пиковых температур удастся на 50...80% сократить выбросы оксидов азота.

Двигатель MDI

Тепловые эффекты при сжатии и расширении воздуха являются одним из препятствий на пути создания высокоэффективного пневмомотора. Как известно, температура газов при сжатии увеличивается, а при расширении уменьшается. Газ как бы «сопротивляется» изменению своего состояния. Чем быстрее происходят изменения состояния воздуха в какой-либо системе, тем сильнее сопротивление, т.к. уменьшается время взаимодействия с окружающей средой и система становится более изолированной. В случае использования сжатого воздуха для привода мотора, давление питающего воздуха быстро падает, что приводит к его резкому охлаждению, что, в свою очередь, снижает эффективность мотора или в худшем случае приводит к замерзанию содержащейся в воздухе влаги и закупориванию питающей магистрали.

В конце 1990-х годов французской фирме MDI удалось минимизировать эти эффекты в запатентованном Ги Негром (Guy Négre) пневмодвигателе. В изначальной версии мотора поршень «цилиндра сжатия» сжимал воздух, поступающий из атмосферы (до 2 МПа), выталкивая его в небольшую смесительную камеру. В эту же камеру впрыскивалась небольшая порция сжатого (до 24,8 МПа) воздуха из баллона. Сжатый нагретый атмосферный воздух смешивался с сильно охлаждённым вследствие резкого падения давления воздухом, впрыскиваемым из баллона высокого давления. Тепло воздуха, засасываемого из атмосферы, передавалось воздуху, поступающему из

баллона, и только после этого этот «заряд» подавался в «силовой цилиндр», где совершал полезную работу. Это т.н. «неадиабатическое» расширение позволяло повысить эффективность пневмомотора.

В новой версии пневмомотора, разработанной фирмой MDI в 2004 г. с использованием патентов Armando Regusci, также используется двухстадийное расширение воздуха, позволяющее ещё больше повысить эффективность. В данной конструкции «силовой цилиндр» «раздвоился» на два – меньшего и большего диаметра, которые называются соответственно «активным цилиндром» и «расширительным цилиндром». Эти цилиндры находятся относительно друг друга в противофазах. Воздух из смесительной камеры подаётся в активный цилиндр под постоянным давлением 2 МПа. Когда поршень активного цилиндра достигает нижней мёртвой точки, открывается перепускной клапан, направляющий воздух в расширительный цилиндр. Только с этого момента воздух начинает расширяться. В результате этого расширения температура воздуха в конце такта снижается до $-40\dots-70^{\circ}\text{C}$, однако это уже не приводит к неблагоприятным последствиям, т.к. замёрзшая влага удаляется с «выхлопом». Полезная работа совершается как в активном, так и в расширительном цилиндрах.

Эффективность мотора (с учётом трансмиссии) в демонстрационном исполнении достигает 39%, однако инженеры MDI обещают поднять эту величину до 55% в серийной продукции. Однако если учитывать затраты энергии, требующиеся для сжатия воздуха при заправке баллонов компрессором с эффективностью 58%, окажется, что полная эффективность пневмоавтомобиля всего около 23%. Это почти в три раза меньше эффективности электромобиля с Li-Ion аккумуляторной батареей. Но зато в 3...5 раз дешевле и легче [125].

Для повышения запаса хода автомобиля с пневмодвигателем предусмотрена возможность его работы в гибридном режиме, который заключается в дополнительном подогреве воздуха в смесительной камере за счёт сжигания в ней биотоплива. Сжигание происходит в большом количестве воздуха при температуре до 600°C , поэтому образование ЗВ минимально.

Гибридные маховичные автомобили

Маховичные накопители кинетической энергии в современных гибридах используются, главным образом, в качестве **рекуператоров кинетической энергии торможения** (англ. *kinetic energy recovery system, KERS*¹), т.е. в качестве «динамического» энергопривода в составе гибридного привода.

Величина кинетической энергии вращающегося маховика E_f , Дж, определяется выражением

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot J_f \cdot \omega_f^2, \quad (9)$$

где J_f – момент инерции маховика, (кг·м²)/с;

ω_f – угловая скорость маховика, с⁻¹.

Из данного выражения видно, что увеличение частоты вращения маховика – ключевая технология для снижения его массы и габаритов. В настоящее время в конструкции гибридных автомобилей используются относительно лёгкие маховики, массой в десятки килограмм, изготовленные из особо прочных композитных материалов, и рабочей частотой вращения в десятки тысяч оборотов в минуту². Расположен такой маховик внутри герметичного корпуса в вакууме на специальных электромагнитных подшипниках.

Маховичные KERS могут выполняться в исключительно механическом исполнении или в виде электромеханических устройств.

Механический маховичный KERS подключается к трансмиссии через несколько зубчатых передач с фиксированным передаточным числом, сцепление и тороидальный бесступенчатый вариатор (рис. 51). Такие конструкции могут размещаться как на дифференциале, так и на коробке передач.

Бесступенчатый тороидальный вариатор имеет КПД до 95% и позволяет плавно изменять передаточное число от 1:1 до 1:6. Совместно

¹ Кроме маховичных KERS существуют конструкции с использованием энергии ленточной пружины (как в рулетке или в старых «заводных» игрушках). Однако широкого применения в автомобилестроении такие системы не получили.

² До 64500 об/мин.

с несколькими зубчатыми парами он обеспечивает согласование частот вращения маховика и приводного вала. Многодисковое сцепление обеспечивает плавное подключение и отключение маховика от ведущей оси.

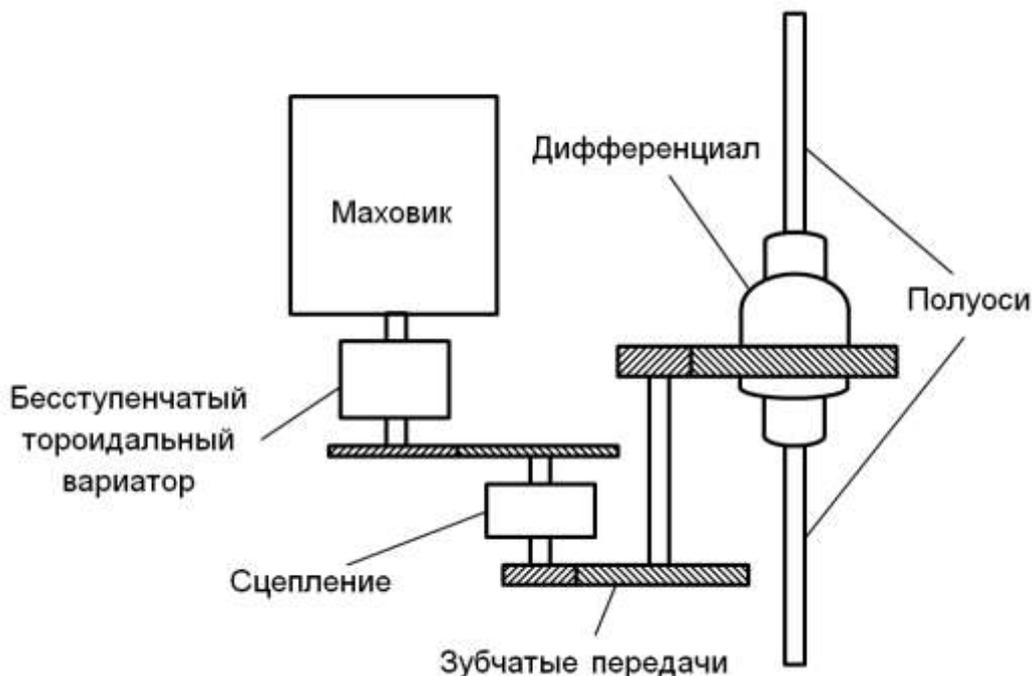


Рис. 51. Схема механической маховичной KERS с приводом от задней оси автомобиля

Электромеханические маховичные KERS устанавливаются на электромобилях или электрогибридах, т.к. они оснащены подсистемой хранения и использования электрической энергии (рис. 52). Они менее эффективны, чем чисто механические, но не требуют сложного механического привода.

В качестве электрической машины используются бесщёточные мотор/генераторы с постоянными магнитами в роторе или с переменным магнитным сопротивлением ротора. Преимущество таких машин не только в отсутствии необходимости подавать электрический ток на вращающийся с огромной частотой вращения ротор, но и в отсутствии необходимости охлаждать ротор, что в условиях вакуума представляет трудновыполнимую задачу.

Электромеханические маховичные KERS значительно эффективнее и долговечнее, чем обычные аккумуляторы, однако конкурируют по этим показателям с ёмкостными накопителями электроэнергии.

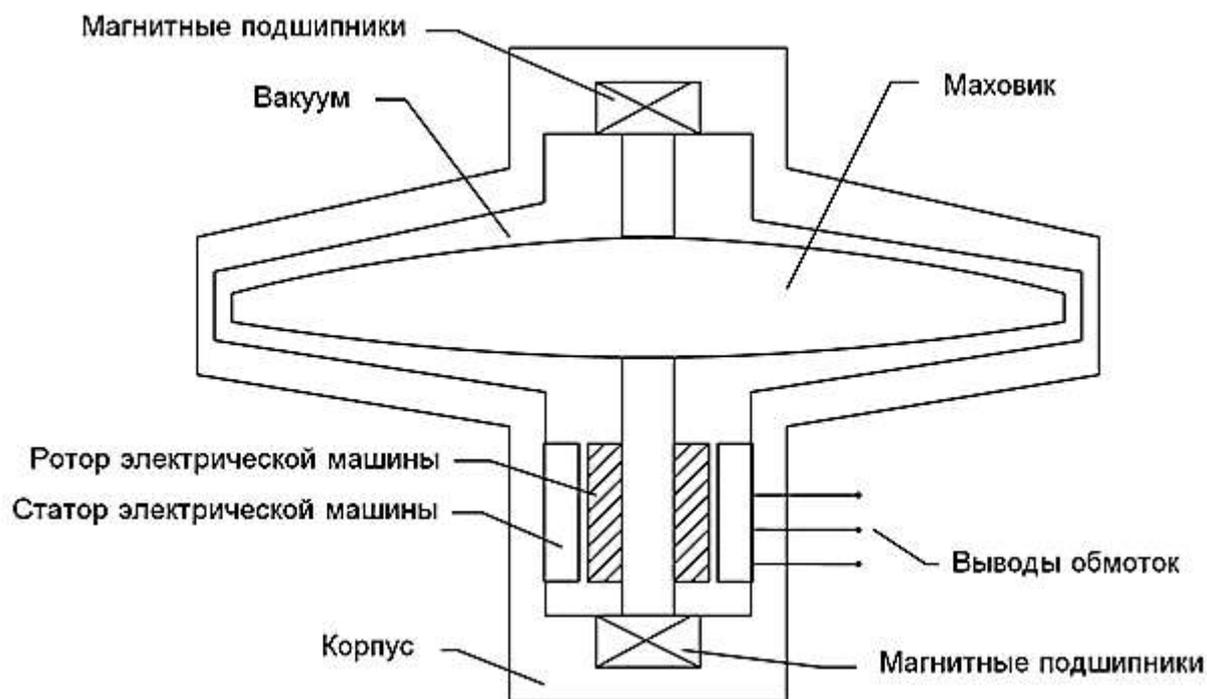


Рис. 52. Схема электромеханической маховичной KERS

Система рекуперации кинетической энергии, основанная на маховиках, представляется довольно перспективной, поскольку задействует в два раза больше энергии торможения по сравнению с электрической системой рекуперации, т.к. вид энергии во время запасания и применения не изменяется. Кроме того, современные сверхскоростные маховики характеризуются высокими значениями удельной энергии ($10 \dots 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$) и удельной мощности ($2 \dots 100 \text{ кВт/кг}$), быстродействия, долговечности, экономичности и экологичности.

Однако, несмотря на свои преимущества, маховичные KERS имеют ряд недостатков. Во-первых, вращение маховика сопровождается возникновением гироскопического эффекта в случае изменения в пространстве оси его вращения. Гироскопические силы возникают при повороте автомобиля или при изменении его продольной оси в вертикальной плоскости (при спуске, подъёме или преодолении неровностей дороги) и могут ухудшить управляемость автомобиля. Во-вторых, поломка маховика будет сопровождаться высвобождением мощности порядка нескольких мегаватт, что может привести к серьёзным разрушениям автомобиля.

Теоретически, гироскопический эффект можно устранить, используя

два маховика меньшего размера, вращающихся в противоположных направлениях. Однако на практике возникают вопросы взаимного согласования работы таких парных маховиков. Кроме того, итоговая удельная энергоёмкость системы KERS на двух маленьких спаренных маховиках вероятнее будет меньше, чем на одном большом.

Моторы для электромобилей и электрогибридов

В данном разделе под термином «электромотор» будем понимать совокупность вращающейся электрической машины, осуществляющей взаимные преобразования электрической и механической энергии, и контроллера, осуществляющего управление этой машиной.

Принцип действия электрической машины как электромеханического преобразователя базируется на электромагнитном взаимодействии, которое осуществляется посредством электрического тока и магнитного поля. Магнитное поле может формироваться либо постоянными магнитами, либо электромагнитами. В конструкции вращающихся электрических машин выделяют ротор – вращающуюся часть, и статор – неподвижную часть, а также воздушный зазор, их разделяющий.

Контроллер обеспечивает функционирование электрической машины либо в тяговом режиме, либо в генераторном режиме или в режиме электротормоза. В режиме электродвигателя он выполняет функции пуска, регулирования частоты вращения и крутящего момента, а в режиме генератора – функции регулирования напряжения и частоты.

Источником электроэнергии в электромобиле является аккумуляторная батарея или топливный элемент, обеспечивающие постоянное напряжение. Поэтому в функции контроллера входит также преобразование постоянного напряжения в переменное (синусоидальное или импульсное) и обратно.

Контроллеры могут быть встроенными в конструкцию электрической машины (например, щёточно-коллекторный узел можно рассматривать как простейший механический контроллер), выполняться в виде отдельного модуля или быть комбинированными. Современные контроллеры для транспортного применения выполняются на базе микропроцессорной техники и полупроводниковых элементов.

Моторы для ЭМ и электрогибридов могут быть разделены на две группы: коллекторные и бесколлекторные (рис. 53).

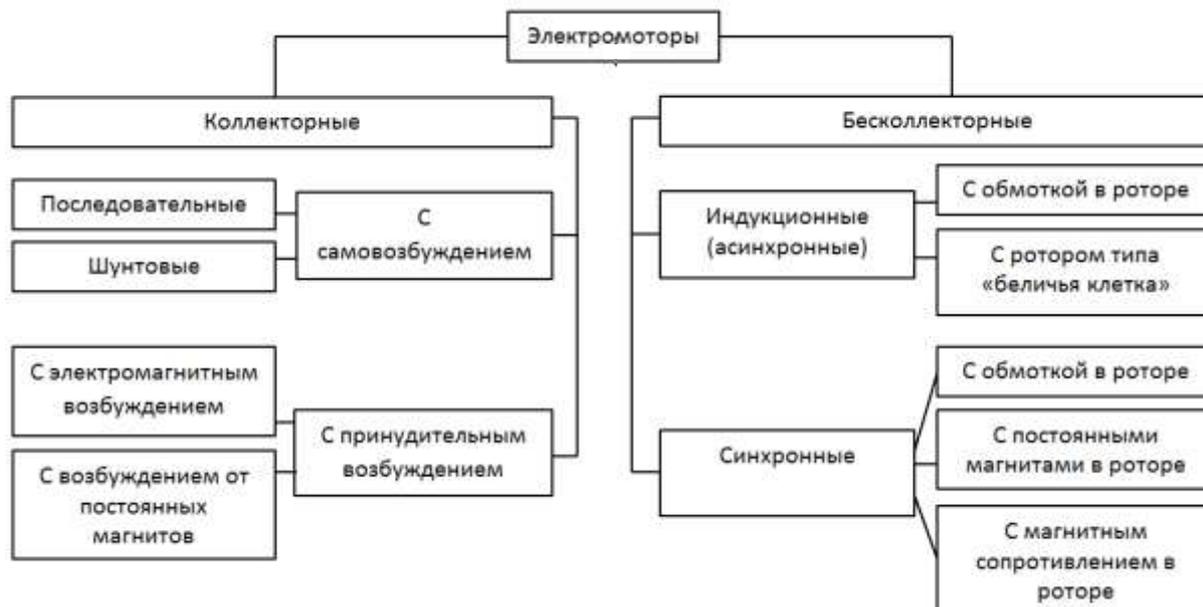


Рис. 53. Классификация наиболее распространённых электромоторов для электромобилей и электрогибридов

Моторы для электромобилей и электрогибридов должны обеспечивать быстрый старт и остановку, быстрый набор частоты вращения, высокий крутящий момент на малых частотах вращения, широкий диапазон изменения частоты вращения, высокую эффективность электромеханических преобразований энергии.

Электромотор с переменной частотой вращения транспортного применения обычно имеет характеристику, показанную на рис. 54. В области частот вращения, меньших, чем базовая частота вращения, мотор выдаёт постоянный крутящий момент. В области частот вращения, бóльших, чем базовая частота вращения, мотор выдаёт постоянную мощность.

Отношение максимальной частоты вращения к базовой частоте вращения называется скоростным фактором X . Чем больше значение скоростного фактора, тем больший крутящий момент может обеспечить электромотор данной мощности, что позволяет упростить конструкцию трансмиссии вплоть до одноступенчатого редуктора. Однако реальные конструкции электромоторов разных типов имеют ограничения по скоростному фактору, например, моторы с постоянными магнитами

имеют значение $X < 2$, моторы с переменным магнитным сопротивлением ротора могут достигать значения $X > 6$, индукционные моторы имеют значение $X \approx 4$.

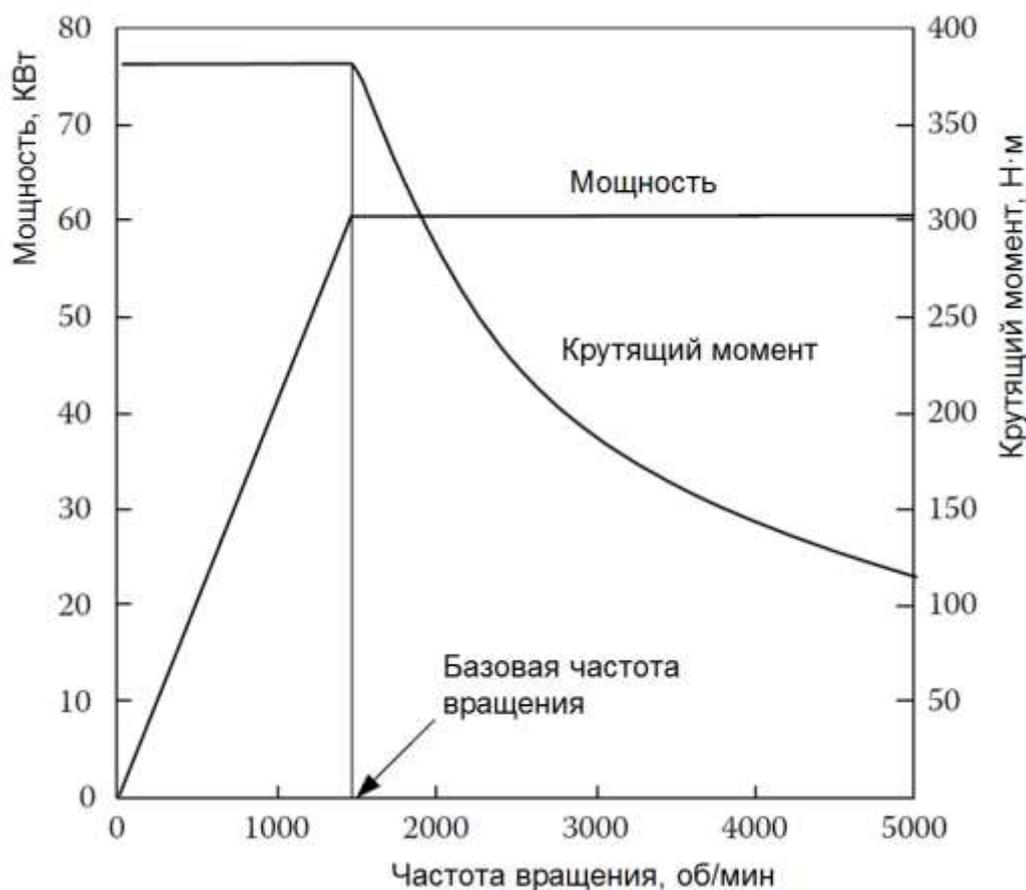


Рис. 54. Типичная характеристика электромотора с переменной частотой вращения для электромобилей

На рис. 55 показана типичная характеристика эффективности электромотора с переменной частотой вращения для электромобилей.

Для условий эксплуатации моторов в составе электромобиля можно выделить три характерные зоны:

- 1) низкая частота вращения и большая нагрузка (характерно для разгона или преодоления подъёма);
- 2) средние значения частоты вращения и нагрузки (характерно для равномерного движения со средними скоростями);
- 3) высокая частота вращения и малая нагрузка (характерно для движения с высокой скоростью под уклон).

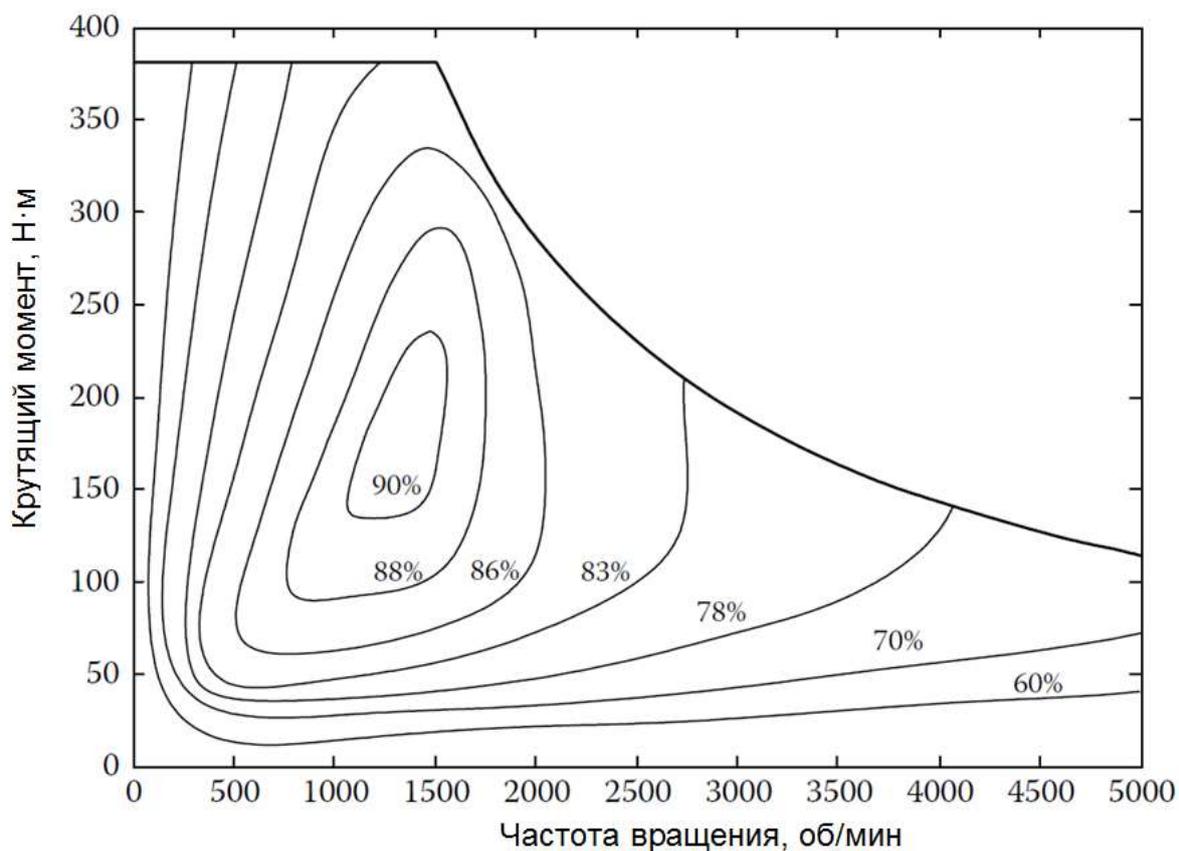


Рис. 55. Типичная характеристика эффективности электромотора с переменной частотой вращения для электромобилей

Для разных типов электромоторов данная характеристика имеет свои особенности как по величине максимальной эффективности, так и по относительному расположению зоны максимальной эффективности.

Коллекторные моторы

Коллекторные моторы в большинстве случаев представляют собой моторы постоянного тока с различными вариантами возбуждения обмоток ротора и статора.

Коллекторные моторы постоянного тока состоят из ротора с расположенной на нём обмоткой и статора с размещёнными в нём постоянными магнитами или электромагнитами.

Принцип действия коллекторного электромотора постоянного тока основан на взаимодействии магнитного поля и электрического тока. Когда проводник, по которому течёт электрический ток, помещают в магнитное поле, на него начинает действовать магнитная сила. Сила направлена

перпендикулярно проводнику и силовым линиям магнитного поля, как показано на рис. 56. Величина этой силы пропорциональна длине проводника L , силе электротока I и напряжённости магнитного поля B , т.е.

$$F \sim B \cdot I \cdot L. \quad (10)$$

Когда из проводника формируют рамку (обмотку), как показано на рис. 56, магнитные силы создают крутящий момент, величину которого можно выразить как

$$F \sim B \cdot I \cdot L \cdot D \cdot \cos \alpha, \quad (11)$$

где α – угол между плоскостью рамки и силовыми линиями магнитного поля.

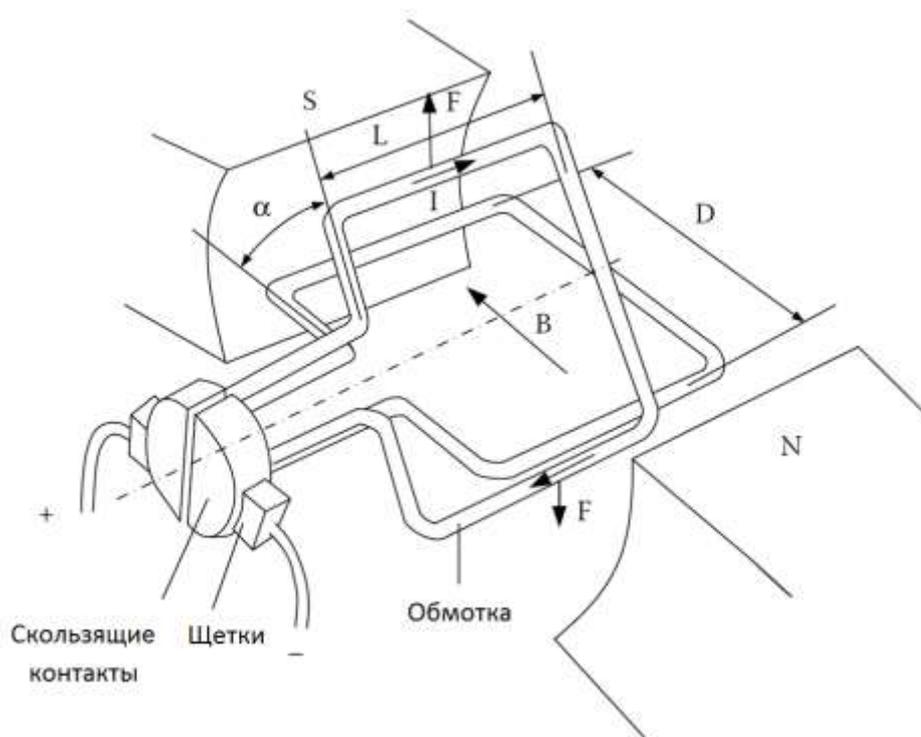


Рис. 56. Схема, поясняющая принцип действия коллекторного электродвигателя постоянного тока

Магнитное поле может формироваться (возбуждаться) или постоянными магнитами, или электромагнитами. Обмотка, по которой протекает электрический ток, называется арматурой. Арматура, как правило, состоит из нескольких обмоток.

Для обеспечения непрерывного вращения и максимального крутящего момента на каждую обмотку подаётся напряжение в

положении, когда $\alpha=0$. Переключение обмоток происходит в щёточно-коллекторном узле.

В моторах с электромагнитным возбуждением магнитного поля статора обмотки арматуры и обмотки электромагнита могут запитываться от одного источника (в этом случае моторы называются «с самовозбуждением») и включаться последовательно или параллельно (с шунтирующим сопротивлением) друг другу. В случае если обмотки арматуры и обмотки электромагнита статора запитываются от разных источников энергии, говорят о «принудительном возбуждении». Все эти варианты отличаются друг от друга способами (удобством) регулирования и выходными характеристиками.

Щёточно-коллекторный узел, через который ток подаётся на обмотку ротора, является слабым местом таких моторов, делая их менее надёжными и требующими периодического технического обслуживания. Кроме того, такие моторы характеризуются низкой удельной мощностью. Тем не менее, благодаря отлаженной технологии производства и простому управлению, коллекторные моторы широко используются в электроприводе АТС.

Бесколлекторные моторы

К преимуществам бесколлекторных моторов относятся: высокая удельная мощность, высокая эффективность, надёжность и отсутствие необходимости обслуживания, низкая операционная стоимость.

Индукционные моторы

Индукционный (асинхронный) мотор состоит из обмоток, расположенных как на роторе, так и на статоре. Напряжение, подаваемое на концы обмоток статора, создаёт в них электрический ток, приводящий к появлению вокруг обмоток магнитного поля. Контроллер мотора переключает напряжение от одной обмотки к соседней по кругу, заставляя магнитное поле «вращаться». Изменяющееся магнитное поле, проходя сквозь обмотки ротора¹, индуцирует в них электрический ток,

¹ Наиболее часто обмотки ротора выполняются короткозамкнутыми, по виду напоминая «беличью клетку» или же полый цилиндр из алюминия или меди.

который, в свою очередь, формирует собственное магнитное поле, противодействующее магнитному потоку статора. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора создаёт крутящий момент, приводящий ротор в движение. Чтобы в обмотке ротора возникала ЭДС, необходимо, чтобы частота вращения ротора отличалась от частоты вращения поля статора. Поэтому ротор вращается асинхронно относительно поля статора, а двигатель называется асинхронным. Относительная разность частоты вращения ротора и частоты вращения поля статора называется скольжением. Номинальное скольжение обычно составляет 2...8%.

Индукционные моторы отличаются низкой стоимостью (примерно на 25% меньше, чем у синхронных моторов с постоянными магнитами [126]), высокой надёжностью и практически не требуют обслуживания. Однако традиционное управление индукционным мотором на основе изменения величины и частоты напряжения не обеспечивает ему требуемых характеристик. Только после изобретения силовой электроники с микропроцессорным управлением стало возможным реализовать т.н. «векторное» управление, решившее проблему нелинейности характеристик. Однако и после этого, индукционным моторам всё ещё присущи недостатки в виде низкого КПД при работе на малых нагрузках и ограниченного значения скоростного фактора. Это связано с тем, что магнитные поля как ротора, так и статора создаются при помощи пропускания через их обмотки электрического тока, а это сопровождается «омическими» потерями, пропорциональными квадрату тока.

Синхронные моторы

Принцип действия синхронного мотора основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и магнитного поля полюсов индуктора, расположенного на роторе. В качестве индуктора используются электромагниты (ток на обмотки ротора подаётся через скользящие контакты «щётка-кольцо») или постоянные магниты. Кроме того, в качестве индуктора может использоваться ротор с переменным магнитным сопротивлением. По сути, мы имеем дело с «обращённой» конструкцией коллекторного мотора, в котором функции коллектора выполняет электронный контроллер.

Синхронные моторы с обмоткой в роторе

Синхронный электродвигатель с обмоткой в роторе имеет ряд преимуществ.

Во-первых, в двигателе нет «редкоземельного» постоянного магнита. Стоимость таких магнитов очень нестабильна, часто они значительно увеличивают производственные затраты.

Во-вторых, соответствующая регулировка тока возбуждения ротора позволяет сформировать «идеальную» внешнюю скоростную характеристику мотора.

В-третьих, ограничение силы тока в роторе приводит к высокому КПД на режимах малой мощности, в которых электродвигатель работает большую часть времени при типичных условиях движения электромобилей в городе.

Недостатком моторов с обмоткой в роторе является наличие углеродных щеток с контактными кольцами. Эти детали быстро изнашиваются и являются источником большого количества абразивной пыли внутри электродвигателя. К счастью, эту проблему можно решить с помощью вращающегося трансформатора (резольвера) для передачи мощности катушке ротора без механического контакта.

Синхронные моторы с постоянными магнитами в роторе

Синхронные электромоторы с постоянными магнитами в роторе называют также «бесщёточными моторами с постоянными магнитами».

Бесщёточные моторы состоят из статора, в котором размещены обмотки, и ротора, в котором размещены постоянные магниты. Основное преимущество такой конструкции заключается в том, что магниты формируют своё собственное магнитное поле без необходимости пропускания через них электрического тока. При этом удаётся устранить щётки и контактные кольца, а также избавиться от электрических потерь в обмотках ротора.

Контроллер мотора подаёт напряжение только на обмотки статора, формируя в статоре вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с магнитным полем постоянных магнитов в роторе, создаёт крутящий момент, приводящий ротор в движение. Для получения наилучших характеристик здесь также используется «векторное» микропроцессорное управление.

В настоящее время в электромоторах используется четыре типа постоянных магнитов:

1. Сплавы ЮНДК – сплав алюминия (Al – 7...12%), никеля (Ni – 14...25%), кобальта (Co – 5...38%) и железа (Fe) с возможным добавлением меди (Cu – 3...4%), титана (Ti – 1...8%) и некоторых других элементов [127], [128]. Зарубежный аналог названия этих сплавов «альнико» (англ. *AlNiCo*) – акроним от входящих в состав элементов.
2. Керамические магниты (ферриты) с общей формулой $MO \cdot 6Fe_2O_3$, где M обычно представляет барий (Ba) или стронций (Sr).
3. Двухкомпонентные (бинарные) или трёхкомпонентные сплавы редкоземельных металлов (англ. *rare-Earth, RE*) и переходных металлов (англ. *transition metal, TM*). Из редкоземельных металлов наиболее часто используются самарий (Sm), празеодим (Pr), неодим (Nd), церий (Ce), гадолиний (Gd) и диспрозий (Dy). Из переходных металлов используют кобальт (Co), железо (Fe), медь (Cu), цирконий (Zr) и гафний (Hf). Существует три подгруппы подобных сплавов: $RE-Co_5$, RE_2-TM_{17} и $RE_2-TM_{14}-B$. $RE-Co_5$ – это сплав редкоземельного элемента с кобальтом. При этом на один атом редкоземельного элемента приходится пять атомов кобальта, что соответствует массовой доле редкоземельного элемента 34...39%. RE_2-TM_{17} – это сплав редкоземельного элемента с металлом переходной группы, при этом на два атома редкоземельного элемента приходится 17 атомов металла переходной группы. Это соответствует массовой доле редкоземельных элементов 23...28%. $RE_2-TM_{14}-B$ – это сплав редкоземельного элемента с металлом переходной группы (как правило – железом) и бором (B), при этом на два атома редкоземельного элемента приходится 14 атомов металла переходной группы и один атом бора. Это соответствует массовой доле редкоземельных элементов 30...35%.
4. Железо-хромо-кобальтовые сплавы с возможным добавлением ванадия (V), кремния (Si), титана (Ti), циркония (Zr), марганца (Mn), молибдена (Mo) и алюминия (Al).

Сравнительные характеристики постоянных магнитов разных типов представлены в табл. 16 [128].

Таблица 16

Некоторые свойства постоянных магнитов

Тип магнита	Остаточная намагниченность, мТл	Коэрцитивная сила, кА/м	Плотность, г/см ³	Температура Кюри, °С	Макс. рабочая температура, °С
Al Ni Co Fe	720...1350	37...151	7,3	860	500
Ферриты	230...400	150...290	4,9	450	200
RE-Co ₅	830...950	600...720	8,4	750	300
RE ₂ -TM ₁₇	1000...1160	480...840	8,4	825	350
RE ₂ -TM ₁₄ -B	1000...1410	760...1030	7,4	310	150
Fe Cr Co	880...1400	16...51	7,7	640	500

Примечания. 1) Остаточная намагниченность – намагниченность, которую имеет ферромагнитный материал при напряжённости внешнего магнитного поля, равного нулю. 2) Коэрцитивная сила – это значение напряжённости магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества. Чем большей коэрцитивной силой обладает магнит, тем он устойчивее к размагничивающим факторам. 3) При температуре Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его намагниченности, в результате ферромагнетик становится парамагнетиком.

Производят электромоторы с постоянными магнитами, расположенными по периферии ротора и внутри ротора (рис. 57). Использование электродвигателей с периферийным расположением магнитов обеспечивает большую мощность на высоких оборотах, в то время как внутреннее расположение постоянных магнитов в роторе формирует высокий крутящий момент при низких оборотах, тем самым увеличивая значение скоростного фактора.

Бесщёточные моторы с постоянными магнитами характеризуются компактностью (примерно на 37%) и меньшей массой (примерно на 30%) по сравнению с индукционными. Эти моторы характеризуются высоким КПД в области рабочих режимов, что связано с наличием постоянных магнитов, создающих магнитное поле без дополнительных затрат энергии, а также с отсутствием щёточно-коллекторного узла с присущими ему потерями на трение.



Рис. 57. Варианты расположения постоянных магнитов в роторе синхронных моторов переменного тока

Высокий КПД характерен для всех режимов работы мотора, за исключением режимов в области малых нагрузок и высоких частот вращения, что объясняется относительно высокими магнитными потерями (магнитный поток постоянных магнитов не уменьшается, как это происходит в случае индукционного мотора или синхронного мотора с обмоткой в роторе).

Поскольку в роторе не течёт электрический ток, то в нём нет тепловыделений, а значит, его не нужно охлаждать. Охлаждение же статора гораздо проще организовать.

Бесщёточные моторы с постоянными магнитами надёжны и долговечны, выделяют мало шума.

Однако у них есть и недостатки. Наиболее эффективные магниты из сплавов редкоземельных металлов имеют высокую стоимость. Значение скоростного фактора у таких моторов обычно не превышает двух. Поскольку постоянный магнит притягивает металлические объекты, необходима хорошая герметизация мотора для предотвращения налипания на роторе металлического «мусора». Постоянные магниты могут размагничиваться при воздействии на них сильных оппозитных магнитных полей или высокой температуры. У моторов с размещением магнитов на поверхности ротора имеются сложности по обеспечению прочности такого соединения, что приводит к необходимости ограничения частоты вращения. Наконец, при возникновении в одной из обмоток статора короткого замыкания, сопровождающегося резким увеличением тока, возникает большой крутящий момент, блокирующий вращение

ротора. Поскольку ротор механически связан с ведущими колёсами автомобиля, то они также блокируются, что может привести к потере управляемости электромобиля и аварии.

Синхронные моторы с магнитным сопротивлением в роторе

В случае если вместо обмоток возбуждения или постоянных магнитов в роторе используется комбинация материалов с различной магнитной проводимостью, говорят о синхронном моторе с магнитным сопротивлением в роторе (рис. 58). На роторе сделаны выступы из электротехнической стали, которые изменяют магнитное сопротивление зазора между ротором и статором. Когда напротив полюса катушки статора находится выступ ротора, магнитное сопротивление зазора минимально. Когда же напротив полюса катушки статора находится выемка ротора, магнитное сопротивление зазора максимально. Ротор всегда стремится занять положение, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению. Поэтому последовательное включение обмоток статора заставляет ротор вращаться. Переключение обмоток осуществляется управляющей электроникой на основании информации о положении ротора. Такие моторы просты и недороги, характеризуются высокой удельной мощностью и эффективностью, поэтому находят широкое применение в электромобилях и электрогибридах.

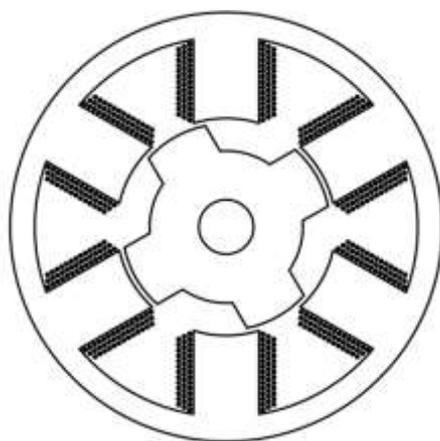


Рис. 58. Схема разреза 3-фазного 4-полюсного синхронного электромотора с переменным магнитным сопротивлением ротора

Среди недостатков моторов с магнитным сопротивлением в роторе следует упомянуть сложность управления, связанную с выраженными краевыми эффектами, возникающими на границах выступов и впадин

ротора. Вторым недостатком связан с наличием датчика положения ротора, необходимого для правильной работы контроллера. Обычно датчики довольно чувствительны к вибрации, температурным перепадам и пыли и являются слабым местом рассматриваемых моторов. Для устранения данного недостатка были разработаны алгоритмы определения позиции ротора без необходимости использования датчика положения.

Наконец, моторы с переменным магнитным сопротивлением ротора характеризуются высоким уровнем пульсации крутящего момента и соответствующего акустического шума.

Накопители электроэнергии

Электрохимические аккумуляторы

Электрохимические аккумуляторные батареи, более часто называемые просто «батареи» или «аккумуляторы», представляют собой электрохимические устройства, которые преобразуют электрическую энергию в потенциальную химическую энергию во время режима заряда, или, наоборот, преобразуют потенциальную химическую энергию в электрическую энергию во время режима разряда. Батареи собирают из нескольких ячеек, соединяя их определённым образом для достижения необходимых характеристик батареи. Каждая ячейка представляет собой независимое и самостоятельное устройство, обладающее всеми необходимыми электрохимическими свойствами.

В общем случае электрохимическая ячейка состоит из трёх основных элементов: двух электродов (негативного и позитивного), погружённых в электролит (рис. 59) [118].

Электрод, на котором происходит реакция окисления, называется анодом, а электрод, на котором происходит реакция восстановления, – катодом. Электроды изготавливают из электропроводящего материала (металла или углерода), реже из полупроводника. Носителями заряда в электродах являются электроны.

Электролитом называется проводящее вещество в электрохимических ячейках. Носители заряда в электролитах называются ионами (от греч. «странник», «скиталец»), причем ионы, движущиеся к аноду, получили название «анионов», а к катоду – «катионов».

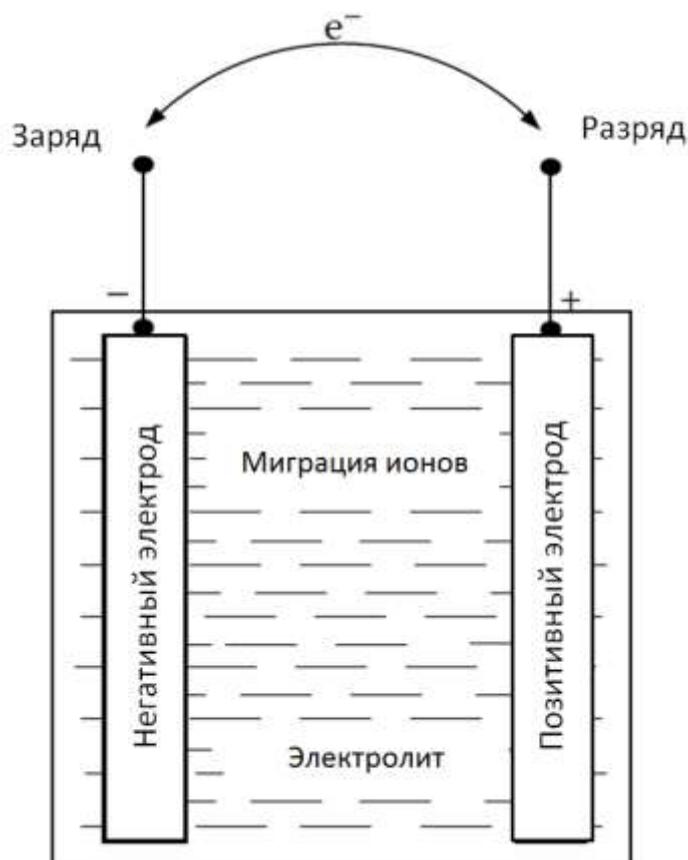


Рис. 59. Принцип работы электрохимической ячейки

Основные электрические параметры электрохимических ячеек – сила тока (её измеряют в амперах, А) и потенциал (измеряемый в вольтах, В). Сила тока определяется скоростью электродных реакций, а потенциал – химической энергией протекающих в ячейке процессов. Он равен энергии (измеряемой в джоулях, Дж), отнесённой к количеству электричества (измеряемому в кулонах, Кл), т.е. $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Следовательно, потенциал ячейки (электродвижущая сила, ЭДС) – это мера энергии, вырабатываемой в ходе протекающих в ней реакций.

Потенциометрические измерения проводят в условиях, когда ток в электрохимической ячейке отсутствует. Это значит, что в ней не происходит никаких суммарных химических изменений, а измеряемый потенциал (равновесный) определяется термодинамикой реакций. В этих условиях такие факторы, как размер и форма электродов или интенсивность перемешивания раствора, не влияют на измеряемый потенциал. Если же через электрохимическую ячейку течёт ток, то скорость электродных реакций зависит не только от термодинамических

параметров, но и от силы тока. В этом случае потенциал электрохимической ячейки зависит от кинетических факторов, а также от материала, из которого сделан электрод, размеров и формы электрода, интенсивности перемешивания раствора и многих других факторов. Нельзя пренебречь и внутренним сопротивлением ячейки. Кроме разности потенциалов на обеих границах электрод/электролит возникает падение напряжения в самом растворе, обусловленное его сопротивлением.

При пропускании внешнего тока потенциал электрода отличается от равновесного. Это отклонение называется **поляризацией**, а его величина – **перенапряжением**. Перенапряжение зависит от нескольких факторов, лимитирующих скорость электродных реакций. Быстрые электродные реакции при данной плотности тока (сила тока на единицу поверхности электрода) идут при потенциалах, близких к термодинамическим, а, следовательно, при малом перенапряжении. Для медленных реакций характерно высокое перенапряжение. Скорости электродных реакций, а значит, и перенапряжение зависят от концентрации реагентов, температуры, растворителя, материала электрода, способа и скорости переноса массы, плотности тока. Суммарное перенапряжение можно разложить на несколько компонентов: концентрационное, активационное и реакционное [129].

Концентрационное перенапряжение обуславливается тем, что при прохождении тока изменяется концентрация реагирующих ионов на поверхности электрода, поскольку в этой области расходуются электроактивные вещества и образуются продукты реакции.

Активационное перенапряжение возникает в результате того, что перенос электронов на поверхности электрода осуществляется не мгновенно, а с конечной скоростью. Чтобы переносить электроны на окисленные соединения с заданной скоростью (т.е. при данной плотности тока), необходимо преодолеть энергетический барьер, называемый энергией активации электродной реакции.

Реакционное перенапряжение возникает в том случае, когда перенос электронов на электроде сопряжен с химической реакцией в растворе. Такая реакция может служить источником частиц, участвующих в переносе электронов, и при этом лимитировать скорость всего

электродного процесса.

Вот почему так важно знать детали механизма (т.е. стадии и промежуточные состояния) электродных реакций. Во многих случаях исходное вещество, прежде чем стать конечным продуктом на электроде, претерпевает несколько превращений.

Производители обычно указывают **кулонометрический запас электричества батарей** (в ампер-часах¹), который определяется количеством ампер-часов, полученных при разряде батареи из полностью заряженного состояния в состояние, при котором напряжение на клеммах батареи снизится до напряжения отключения² (рис. 60). Указанная величина характеризует запас электричества при стандартной температуре (обычно 20°C) и определённом разрядном токе. Снижение рабочей температуры (особенно в зону отрицательных величин) существенно снижает энергоёмкость аккумулятора.

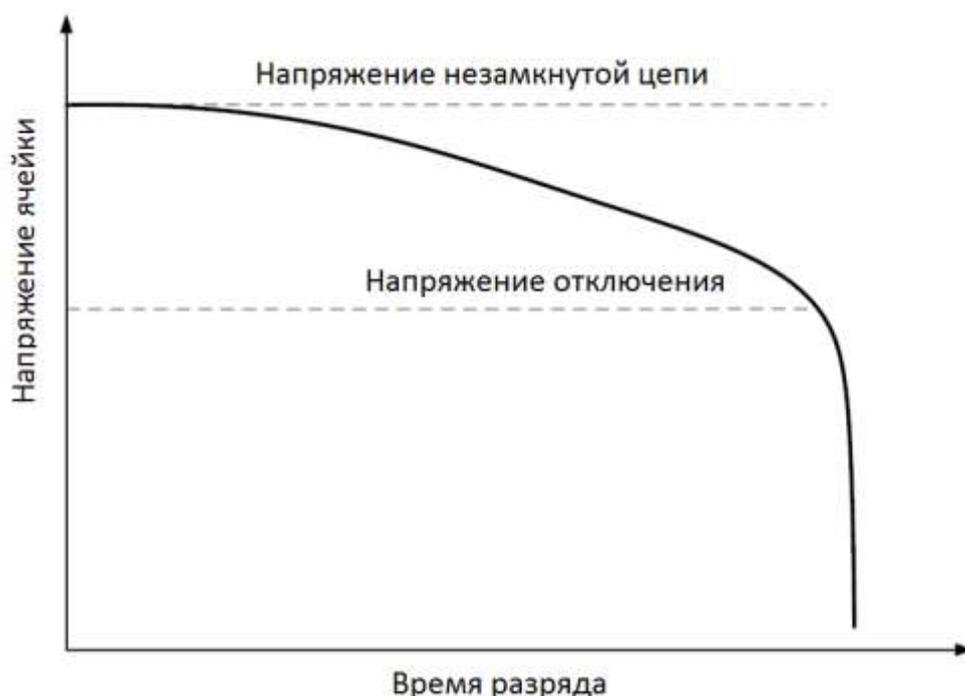


Рис. 60. Типичная характеристика разряда электрохимической ячейки

¹ Один ампер-час представляет собой электрический заряд, проходящий за 1 час через поперечное сечение проводника при пропускании тока 1 ампер. Один ампер-час равен 3600 Кл.

² Для автомобильных стартерных аккумуляторов оно составляет 10,5 В согласно ГОСТ Р МЭК 61056-1-99.

Одна и та же батарея обычно выдаёт различное количество ампер-часов при разных разрядных токах. В общем случае запас электричества батареи снижается при увеличении разрядного тока. При маркировке батарей это обстоятельство учитывается либо явно, либо по умолчанию. Режим разряда может быть указан явно, например, «100 А·ч при C/5», что означает запас электричества 100 А·ч при 5-часовом режиме разряда током 20 А ($100/5=20$). Для наиболее распространённых типов батарей режим разряда стандартизируется и принимается по умолчанию. Например, для автомобильных стартерных аккумуляторов принимается режим «C/20», т.е. 20-часовой разряд током, составляющим 1/20 от указанного в маркировке запаса электричества. Например, надпись на маркировке аккумулятора «55 А·ч» означает, что он способен выдавать ток 2,75 А на протяжении 20 часов, и при этом напряжение на клеммах не опустится ниже 10,5 В.

При последовательном соединении ячеек в батарее запас электричества не изменяется, а напряжение на клеммах батареи определяется как сумма напряжений ячеек. Так, например, при последовательном соединении двух ячеек, имеющих напряжение 3,3 В и запас электричества 10 А·ч, получим батарею с напряжением 6,6 В и запасом электричества 10 А·ч.

При параллельном соединении ячеек в батарее, запас электричества суммируется, а напряжение не изменяется. Так, например, при параллельном соединении двух ячеек, имеющих напряжение 3,3 В и запас электричества 10 А·ч, получим батарею с напряжением 3,3 В и запасом электричества 20 А·ч.

Другим важным показателем является **уровень заряда аккумуляторной батареи** (англ. *state of charge, SOC*). SOC определяется как отношение оставшегося заряда к полному заряду, т.е. у полностью заряженного аккумулятора $SOC=100\%$, а у полностью разряженного¹ $SOC=0\%$. Существует и обратный показатель – **глубина разряда батареи** (англ. *depth of discharge, DOD*). У полностью заряженного аккумулятора $DOD=0\%$, а у полностью разряженного $DOD=100\%$.

¹ Состояние «полной разрядки» аккумулятора зависит от величины разрядного тока и напряжения отключения.

Изменение уровня заряда батареи за интервал времени dt при зарядном или разрядном токе I может быть выражено как

$$\Delta SOC = \frac{I}{Q(I)} dt, \quad (12)$$

где $Q(I)$ – запас электричества батареи (А·ч) при разряде её током I (А). При разряде батареи величина тока положительна, при заряде – отрицательна.

Таким образом, уровень заряда батареи может быть выражен как

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I}{Q(I)} dt, \quad (13)$$

где SOC_0 – первоначальное (исходное) значение SOC.

Для аккумуляторных батарей электромобилей и электрогибридов представляется более важным показателем не кулонометрический запас электричества (в А·ч), а запас энергии (в Вт·ч). Энергия, выдаваемая батареей за время t , определяется как интеграл мгновенной мощности¹

$$E_c = \int_0^t U(I, SOC) \cdot I(t) \cdot dt, \quad (14)$$

где $U(I, SOC)$ – напряжение на клеммах батареи (В), которое является функцией от разрядного тока I и уровня заряда SOC;

$I(t)$ – сила разрядного тока (А), который является функцией от времени t .

Если большая точность не нужна, то вместо интегрирования можно воспользоваться средними значениями напряжения и потребляемого тока:

$$E_c \approx \bar{Q} \cdot \bar{U}, \quad (15)$$

т.е. выдаваемая энергия (в Вт·ч) приблизительно равна произведению средней величины выдаваемого заряда (в А·ч) на среднее напряжение (в Вольтах).

Важным показателем аккумуляторов для электромобилей является величина **удельной энергоёмкости**, т.е. отношения максимального

¹ Мгновенной мощностью называется произведение мгновенных значений напряжения и силы тока на каком-либо участке электрической цепи.

запаса энергии батареи к её массе, измеряемая в Вт·ч/кг. Удельная энергоёмкость определяет запас хода электромобиля.

Теоретическая удельная энергоёмкость аккумуляторов определяется взаимной химической активностью электродов и молекулярной массой реагирующих друг с другом химических элементов. Водород, литий и натрий являются наилучшим выбором для негативных реагентов, а лёгкие галогены, кислород и сера (в виде оксидов и сульфидов) – для позитивных реагентов. Например, для свинцово-кислотного аккумулятора теоретическая удельная энергоёмкость составляет 170 Вт·ч/кг, для никель-кадмиевого – 217 Вт·ч/кг, для литий-кобальтового – 320 Вт·ч/кг, для натрий-серного – 760 Вт·ч/кг, для алюминий-кислородного – 2815 Вт·ч/кг.

Однако в реальных конструкциях батарей величина удельной энергоёмкости значительно ниже, что связано с невозможностью создания идеальных условий для протекания химических реакций, а также с дополнительной массой вспомогательных элементов.

Ещё одним показателем аккумуляторов является удельная мощность, измеряемая в Вт/кг. **Удельная мощность** определяет скорость отдачи энергии и важна для обеспечения интенсивного разгона электромобиля. Этот показатель, по существу, характеризует внутреннее сопротивление батареи при наибольших токовых нагрузках.

Внутреннее сопротивление складывается из кондуктивного (омического) сопротивления и сопротивления, связанного с протеканием химических реакций.

Преобразования энергии в аккумуляторе сопровождаются потерями энергии. **Эффективность** зависит от величины разрядного или зарядного тока, уменьшаясь при его увеличении, а также от уровня заряда батареи.

Типичная зависимость эффективности разрядно-зарядного цикла аккумулятора (рис. 61) имеет максимум в зоне средних величин SOC.

Это обстоятельство показывает, что система управления энергопотоками в электрогибриде должна поддерживать уровень заряда батареи на среднем уровне, где она работает наиболее эффективно.

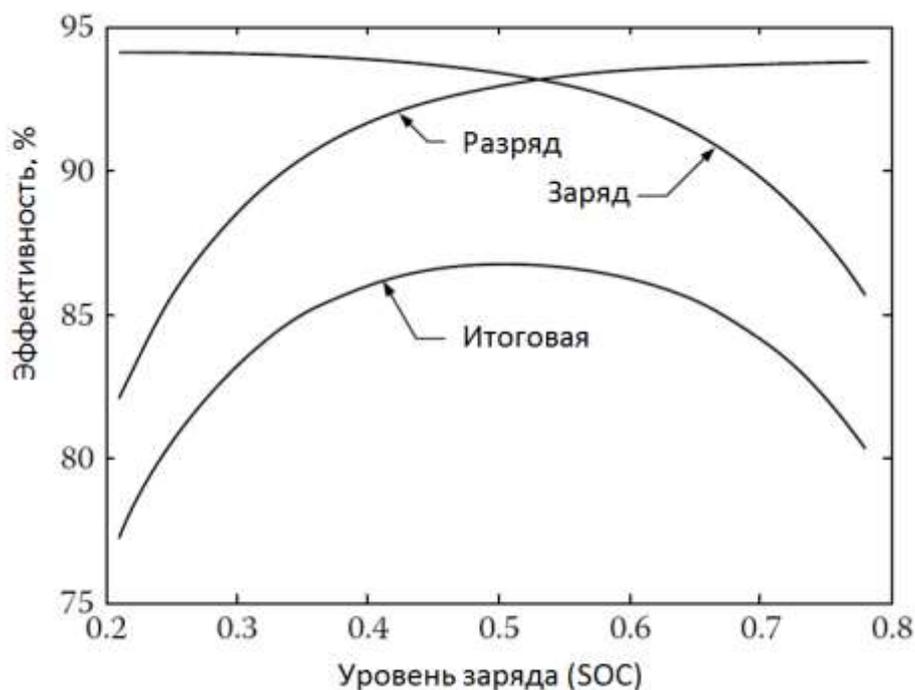


Рис. 61. Типичная характеристика эффективности разрядно-зарядного цикла свинцово-кислотного аккумулятора

Кроме того, чем эффективнее работает батарея, тем меньше она нагревается (т.к. снижаются потери), что благоприятно сказывается на безопасности и долговечности её работы.

Срок службы батарей оценивается количеством разрядно-зарядных циклов, реализовавшихся до момента, когда энергоёмкость батареи снизилась до заданного уровня, обычно до DOD=50...80%.

На срок службы оказывает существенное влияние глубина и интенсивность разрядно-зарядного цикла (рис. 62), а также температурный режим работы батареи.

При проектировании электромобилей и электрогибридов необходимо учитывать возможное изменение характеристик аккумуляторов в режимах и условиях, характерных для реальной эксплуатации.

Во всём мире ведутся интенсивные исследования в области аккумуляторов с высокой ёмкостью. Некоторые характеристики таких аккумуляторов представлены в прил. 2 (по данным [130], [66], [131], [132], [118] и др.).

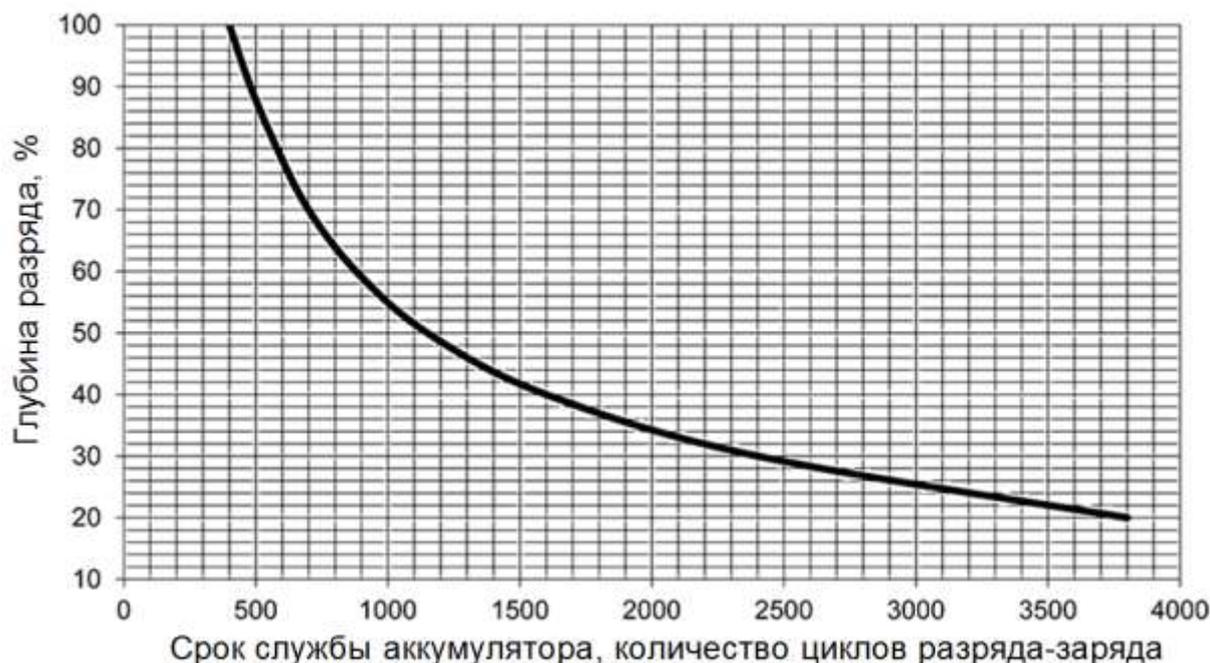
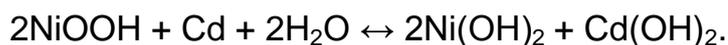


Рис. 62. Типичная зависимость срока службы свинцово-кислотного аккумулятора от глубины разрядно-зарядных циклов

Никель-кадмиевые аккумуляторы

В Ni-Cd-аккумуляторе положительный электрод выполнен из гидрата закиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$ с графитовым порошком (около 5...8%), отрицательный электрод – из гидрата закиси кадмия $\text{Cd}(\text{OH})_2$ или металлического кадмия Cd (в виде порошка), а электролитом является концентрированный раствор гидроксида калия KOH (концентрация – 240 г/л) с добавкой гидроксида лития LiOH (концентрация – 50 г/л) для образования никелатов лития и увеличения ёмкости на 21...25%).

Принцип действия Ni-Cd-аккумуляторов основан на обратимом процессе:



Никелевый электрод представляет собой пасту гидроксида никеля, смешанную с проводящим материалом и нанесенную на стальную сетку, а кадмиевый электрод – стальную сетку с впрессованным в неё губчатым кадмием. Пространство между электродами заполнено желеобразным составом на основе влажной щелочи, который замерзает при -27°C [133].

Благодаря очень низкому внутреннему сопротивлению аккумулятор не нагревается даже при зарядке большим током.

Однако Ni-Cd-аккумуляторы подвержены так называемому «эффекту памяти», т.е. обратимой потере энергоёмкости. Эффект памяти проявляется, когда аккумулятор подвергают зарядке раньше, чем он полностью разрядится. То есть использовать никель-кадмиевый аккумулятор в буферном режиме нельзя. В определённой мере действие эффекта памяти обратимо: «тренировка» аккумулятора, то есть несколько циклов заряда до максимально возможной энергоёмкости и последующего полного разряда может приводить к восстановлению максимальной энергоёмкости до исходного или близкого к нему уровня.

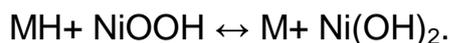
При хранении Ni-Cd-аккумуляторы также теряют энергоёмкость, хотя и сохраняют выходное напряжение, поэтому рекомендуется хранить их в разряженном виде — тогда после первой же зарядки аккумуляторы будут полностью готовы к использованию.

В настоящее время использование никель-кадмиевых аккумуляторов сильно ограничено по экологическим соображениям, поэтому они применяются только в устройствах, характеризующихся большими разрядными и зарядными токами.

Никель-металлгидридные аккумуляторы

В Ni-MH-аккумуляторе положительный электрод выполнен из оксида никеля, отрицательный – из металлгидрида (обычно гидрид никель-лантан или никель-литий), а электролитом является концентрированный раствор гидроксида калия. Металлогидриды являются «хранилищем» водорода, который может внедряться в их кристаллическую решётку.

Принцип действия Ni-MH-аккумуляторов основан на обратимом процессе:



Характеристики Ni-MH-аккумуляторов превосходят характеристики Ni-Cd-аккумуляторов, в них отсутствует токсичный кадмий, поэтому этот вид щелочных аккумуляторов преобладает на рынке.

Ni-MH аккумуляторы практически избавлены от «эффекта памяти», однако саморазряд примерно в 1,5...2 раза выше, чем у Ni-Cd-аккумуляторов. Но с 2005 года на рынке стали появляться LSD Ni-MH-аккумуляторы с низким саморазрядом (англ. *low self-discharge*, *LSD*). Кроме того, LSD-аккумуляторы обычно имеют значительно более

низкое внутреннее сопротивление, чем обычные Ni-MH-батареи.

Ni-MH-аккумуляторы нужно хранить полностью заряженными при температуре 3...5°C.

Литий-ионные аккумуляторы

Литий – наилегчайший металл, обладающий выдающимися электрохимическими свойствами. Поэтому аккумуляторы на основе лития обладают высокими показателями удельной энергоёмкости и удельной мощности.

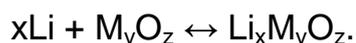
При контакте с водными растворами литий разлагает воду с выделением водорода. Поэтому в качестве электролитов используют неводные (апротонные) или расплавленные материалы. Апротонные электролиты представляют собой органические растворы, твёрдые полимерные вещества и сжиженные газообразные органические соединения¹.

Литиевый аккумулятор запасает или выдаёт энергию за счёт реакции между ионами лития и активным материалом электродов. Ионы лития проникают внутрь молекулярной структуры (или высвобождаются из неё) в ходе процесса, называемого «интеркаляция»².

Различают два варианта реализации данной технологии: литий-полимерный (Li-Pol) и литий-ионный (Li-Ion).

В Li-Pol-аккумуляторе положительный электрод выполнен из интеркалирующего оксида переходного металла (M_yO_z), отрицательный – из металлического лития (Li). Электроды разделены тонким твёрдым полимерным электролитом (англ. *solid polymer electrolyte, SPE*).

Принцип действия Li-Pol-аккумуляторов основан на обратимом процессе:



При разряде ионы лития, образующиеся на отрицательном электроде, мигрируют сквозь твёрдый электролит и внедряются (интеркалируют) в кристаллическую структуру положительного электрода. При заряде процесс идёт в обратном направлении.

¹ Например, флюорометан.

² Интеркаляция – это обратимое включение молекулы или группы между другими молекулами или группами.

Применение твёрдого электролита позволяет формировать ячейки различных форм и размеров, обеспечивает высокую безопасность, однако характеристики ионной проводимости твёрдого электролита обеспечивают лишь умеренные разрядные токи и ухудшаются при низких температурах.

В Li-Ion-аккумуляторе положительный электрод выполнен из литированного оксида переходного металла ($\text{Li}_{1-x}\text{M}_y\text{O}_z$), отрицательный – из литированного углеродного материала (Li_xC). Электроды разделены жидким органическим раствором (соли лития¹ в органических растворителях) или твёрдым полимерным электролитом.

Принцип действия Li-Ion-аккумуляторов основан на обратимом процессе:



При разряде ионы лития, образуясь на отрицательном электроде, мигрируют сквозь электролит и интеркалируют в структуру положительного электрода. При заряде процесс идёт в обратном направлении.

Наиболее распространёнными материалами для положительного электрода являются литированные оксиды кобальта ($\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$), никеля ($\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$) и марганца² ($\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$), а также их комбинации.

Перспективным считается фосфат железа³ ($\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$). От традиционных катодных материалов LiFePO_4 выгодно отличается значительно более низкой стоимостью и нетоксичностью, однако имеет низкие величины электронной и ионной проводимости, поэтому добиться хороших результатов при циклировании можно только при использовании их нанокмпозитов, в основном – с углеродом.

Основным материалом для изготовления отрицательного электрода является графит, который обеспечивает как высокую скорость процессов заряда и разряда, так и сравнительно высокую энергоёмкость за счёт обратимой интеркаляции в межслоевые пространства. Попытки заменить

¹ Например, гексафлюорофосфат лития (LiPF_6), гексафлюороарсенат моногидрат лития (LiAsF_6), перхлорат лития (LiClO_4), тетрафлюороборат лития (LiBF_4), трифлат лития (LiCF_3SO_3).

² Так называемая «шпинель».

³ Так называемый «оливин».

графит теми или иными углеродными наноматериалами пока не дали положительных результатов. Применение более эффективных кремния, олова, сурьмы в кристаллическом состоянии ведёт к неприемлемому изменению объёма электрода при внедрении в них лития. Замена кристаллических анодных материалов наноструктурированными позволяет решить проблемы, связанные с увеличением удельного объёма [134].

Таким образом, развитие литий-ионных аккумуляторов ведётся в направлении поиска более эффективных материалов положительного и отрицательного электродов, как правило, в форме наноструктур, а также в направлении совершенствования электролита.

Суперконденсаторы¹

Суперконденсаторами называют энергонакопительные электрические конденсаторы с двойным электрическим слоем (ДЭС). Конструктивно суперконденсатор представляет собой два электрода из углеродного материала, погруженных в электролит и разделенных между собой диэлектрическим сепаратором, который предотвращает короткое замыкание. В суперконденсаторах энергия накапливается в процессе зарядки за счёт поляризации ДЭС на границах раздела «анод-электролит» и «катод-электролит» (Рис. 63).

В процессе зарядки суперконденсатора случайно распределённые в электролите ионы под действием электрического поля перемещаются по направлению к электроду противоположной полярности.

Важно, что этот процесс представляет собой чисто физическое явление, а не химическую реакцию, то есть не изменяет молекулярную структуру компонентов суперконденсатора и является полностью обратимым.

Поэтому суперконденсаторы обладают большим ресурсом (как по количеству циклов заряд-разряд, так и по продолжительности хранения и использования), чем любые существующие аккумуляторные батареи и не требуют обслуживания на протяжении всего срока службы [135].

¹ Другие названия: гиперконденсаторы, ультраконденсаторы, ионисторы.

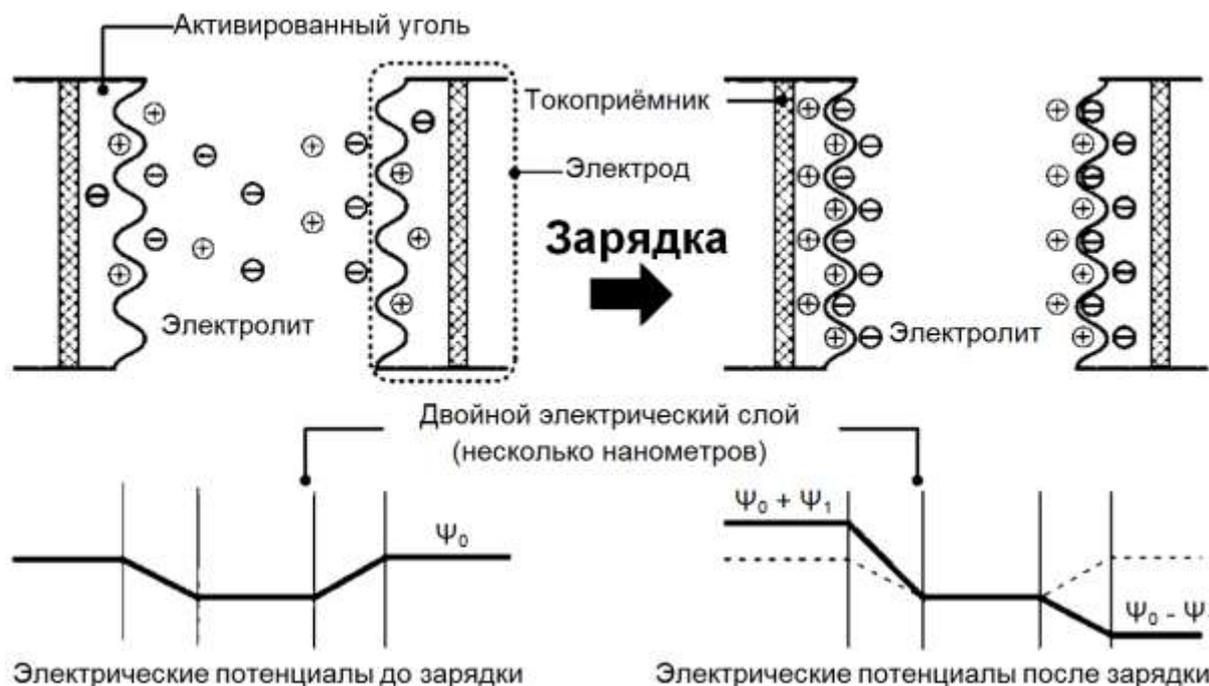


Рис. 63. Принцип действия суперконденсатора. Источник: LS Mtron

Высокая энергоёмкость (в сравнении с обычным электролитическим конденсатором) достигается благодаря двум основным факторам: крайне малой толщине ДЭС (физический эквивалент расстояния между обкладками конденсатора обычной конструкции) и пористой структуре электродов (что позволяет увеличить эффективную площадь поверхности).

В качестве материалов для электродов суперконденсаторов в настоящее время наиболее широко применяются пористые модификации углерода из-за их высокой удельной площади поверхности, достаточно большой электронной проводимости и электрохимической стабильности в растворах водных и неводных электролитов [136].

Энергоёмкость суперконденсаторов непосредственно связана с физико-химическими характеристиками наноструктурных углеродных электродов. Например, активация углерода приводит к увеличению площади его поверхности, что, как правило, увеличивает и ёмкость [137].

Суперконденсатор и аккумуляторная батарея имеют различные зарядно-разрядные характеристики. У аккумуляторной батареи график имеет характерную область (плато), на которой напряжение остаётся практически постоянным в течение определенного времени, тогда как у

суперконденсатора зависимость напряжения от времени заряда/разряда линейная (рис. 64). Получить постоянное напряжение можно, добавив к суперконденсатору DC-DC-преобразователь. Линейная зависимость позволяет легко вычислять остаток накопленной в суперконденсаторе энергии, контролируя выходное напряжение.

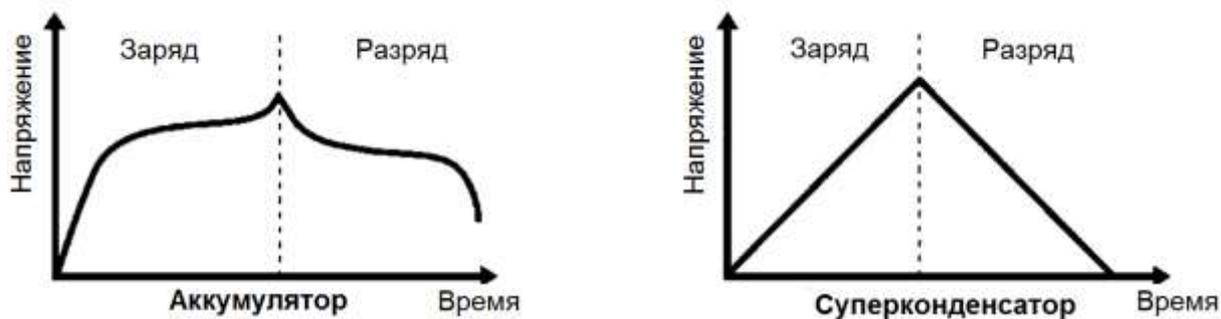


Рис. 64. Зарядно-разрядные характеристики аккумулятора и суперконденсатора. Источник: LS Mtron

Количество энергии (Дж¹), накопленное в конденсаторе, может быть вычислено с использованием следующего выражения:

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C \cdot U^2, \quad (16)$$

где C – электрическая ёмкость конденсатора, Ф;

U – напряжение, используемое в цепи потребителя, В.

Производители рекомендуют использовать суперконденсаторы в диапазоне напряжения от $\frac{1}{2}$ до максимального (при этом высвобождается $\frac{3}{4}$ запасённой энергии).

Высокая удельная мощность и большой срок службы суперконденсаторов позволяют использовать их в качестве буфера энергии в составе силовой установки электромобиля, электрогибрида или электромобиля с топливными элементами. В этом случае суперконденсатор подключается параллельно аккумуляторной батарее или топливному элементу. Согласование рабочих напряжений батареи и суперконденсатора обеспечивается при помощи DC-DC-конвертера.

Как видно из рис. 65, суперконденсатор принимает на себя большинство пиковых значений разрядно-зарядного тока, позволяя батарее работать в более благоприятном режиме [118].

¹ 1 Дж = 1 Вт·с = 1/3600 Вт·ч.

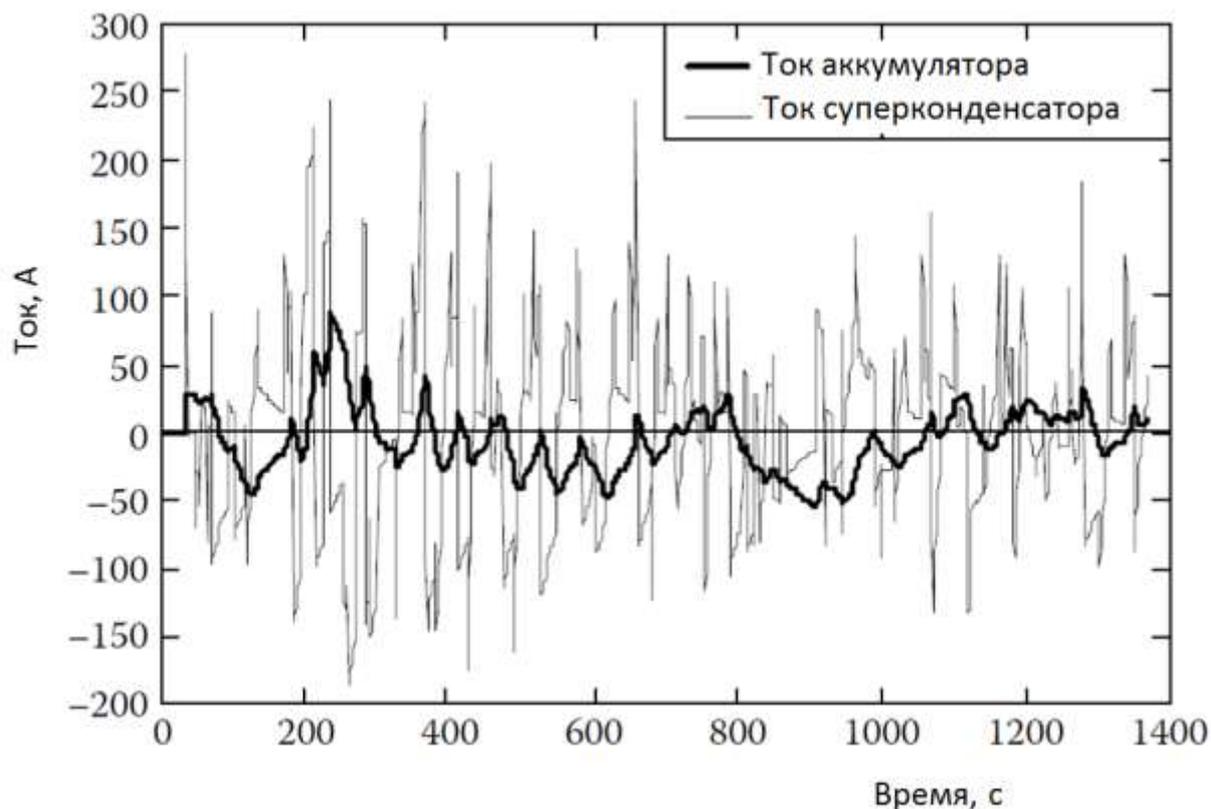


Рис. 65. Изменение тока аккумулятора и суперконденсатора при движении электрогибрида по городскому испытательному ездовому циклу FTP-75

Таким образом, суперконденсаторы чаще используются в качестве буфера энергии, наподобие супермаховика, позволяя оптимизировать характеристики и режим работы (а значит и долговечность) основного источника энергии.

Методы зарядки электромобилей и подключаемых электрогибридов

Продолжительное время зарядки батарей электромобилей и подключаемых электрогибридов считается одним из основных препятствий широкого распространения технологии электропривода. Существует три проблемы, затрудняющие быструю зарядку батарей.

Во-первых, собственно аккумуляторы не способны принять большой заряд в короткое время, что связано с необходимостью протекания в них определённых химических реакций.

Во-вторых, обычная локальная распределительная электросеть не способна обеспечивать высокую быстротечную нагрузку, создаваемую

при заряде электромобиля.

В-третьих, затруднительно обеспечить удобное и эффективное подключение электромобиля к распределительной электросети.

Li-Ion-батареи имеют величину рекомендуемого зарядного тока «1С», т.е. величина зарядного тока (в А) должна быть равна значению номинальной ёмкости батареи (в А·ч) или ёмкости батареи (в кВ·ч), делённой на номинальное напряжение батареи (в В). Литий-железо-фосфатные (LFP или LiFePO_4) и литий-титанатные (LTO или $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) аккумуляторы могут заряжаться более высоким током, однако в этом случае лимитирующим фактором становится перегрев ячеек и коммутационных соединений. Действительно, если попытаться зарядить типичную 500-вольтовую батарею ёмкостью 25 кВ·ч за три минуты током «20С», то величина этого тока будет равна $(25000/500) \cdot 20 = 1000$ А. Чтобы выдержать такой высокий ток, даже за короткое время, потребуются массивные электропроводники как внутри ячеек, так и между ячейками. Кроме того, высокие токи внутри ячеек приводят к росту перенапряжения, которое необходимо преодолевать при зарядке, а следовательно, к росту потерь и снижению эффективности работы батареи в разрядно-зарядном цикле.

Типичная автозаправочная станция рассчитана на одновременную заправку нескольких автомобилей. Мощность для одновременной сверхбыстрой зарядки нескольких электромобилей за сопоставимое время (несколько минут) составит порядка 5 МВт. Учитывая пиковый характер нагрузки с возможными гармоническими составляющими, потребуется источник высокого напряжения порядка 11 кВ, что сопоставимо с потребностями крупного коммерческого или промышленного предприятия.

Третья проблема связана с коммутацией батареи и зарядного оборудования. Зарядное оборудование для сверхбыстрой зарядки с его массивными проводниками и изоляцией располагается не на борту электромобиля, а на стационарной зарядной станции. Это обуславливает необходимость международной стандартизации интерфейсов, не только с позиции силовых разъёмов, но и с позиции контрольных сигналов, использующихся для контроля над процессом заряда батареи, который может представлять опасность.

Кондуктивная (проводная) зарядка электромобилей

Стандарты зарядки электромобилей и подзаряжаемых гибридов разрабатываются Международной электротехнической комиссией (МЭК) или в английском варианте International Electrotechnical Commission (IEC). Основными для кондуктивной зарядки являются стандарты IEC 61851 [138, 139, 140] и IEC 62196 [141, 142, 143]. Стандарт IEC 61851 определяет режимы зарядки, конфигурации подсоединения электромобиля к зарядному оборудованию и ряд специфических требований к таким подсоединениям, в частности требования безопасности. Стандарт IEC 62196 определяет виды используемых разъёмов (розеток и вилок) и методы их испытаний.

Зарядка может осуществляться путём прямого или с использованием промежуточного питающего оборудования (англ. *electric vehicle supply equipment, EVSE*) подсоединения электромобиля к электрическим сетям переменного тока. В этом случае используется бортовое зарядное устройство электромобиля, которое преобразует переменный ток питающего оборудования в постоянный, которым и заряжается тяговая батарея. В этом случае скорость зарядки электромобиля ограничивается либо мощностью бортового зарядного устройства, либо мощностью промежуточного питающего оборудования (что меньше). Для примерного определения времени, необходимого для зарядки конкретного электромобиля от сети переменного тока, следует разделить полезную ёмкость тяговой батареи (в кВт·ч) на мощность зарядного устройства (в кВт).

Согласно IEC 61851, возможны **три режима зарядки переменным током:**

- «Mode 1» – режим зарядки переменным током от бытовой сети. Соединение не должно превышать зарядный ток более 16 А для однофазного (250 В, мощность 3,7 кВт) и трехфазного (480 В, мощность 11 кВт) подключения. Режим запрещен в США и некоторых других странах из соображений безопасности;
- «Mode 2» – режим зарядки переменным током от бытовой сети с использованием системы защиты внутри кабеля. Соединение не должно превышать зарядный ток более 32 А для однофазного (250 В, мощность 7,4 кВт) или трехфазного (480 В, мощность 22 кВт)

подключения. Кабель объединяет в себе функции управления и мониторинга. Обеспечивает защитные функции обнаружения присутствия земли и остаточного тока, защиты от перегрузки по току и перегрева;

- «Mode 3» – режим зарядки переменным током с использованием специального питающего оборудования, в котором реализована система защиты и контроля над процессом зарядки электромобиля. Соединение не должно превышать зарядный ток более 63 А для однофазного (250 В, мощность 14,5 кВт) или трехфазного (480 В, мощность 43,5 кВт) подключения.

Быстрые виды зарядки требуют специальных источников питания и **зарядного оборудования постоянного тока**, включающего цепи управления и коммуникации. При зарядке электромобиля от станции постоянного тока, контролем процедуры занимается сама станция, а не бортовое зарядное устройство заряжаемого электромобиля. Станции постоянного тока называют комплексами экспресс-зарядки или станциями быстрой зарядки. В них реализуется режим зарядки «Mode 4», предусматривающий зарядный ток не более 400 А при постоянном напряжении до 600 В (мощность до 240 кВт). В настоящее время большинство станций быстрой зарядки выпускаются на номинальную мощность 50 кВт, однако по мере развития технологий аккумуляторных батарей планируется переход на более мощные станции: 150 кВт к 2020 году и 240 кВт к 2025 году.

Наиболее распространёнными коннекторами для подсоединения электромобиля к электросети или питающему оборудованию переменного тока являются:

- **тип 1** – пятиштырьковый разъём американского стандарта SAE J1772-2009, предназначенный для зарядки от однофазной сети переменного тока¹;
- **тип 2** – семиштырьковый разъём немецкого стандарта VDE-AR-E 2623-2-2, предназначенный для зарядки от

¹ Иногда называемый «Yazaki» по наименованию первой фирмы-изготовителя.

однофазной и трёхфазной сети переменного тока¹ (рис. 66);

- **тип 3** – семиштырьковый разъём, продвигаемый Альянсом подключаемых электромобилей² (англ. *EV Plug Alliance*) французско-итальянского происхождения. Встречается довольно редко и вероятнее всего будет вытеснен с рынка.

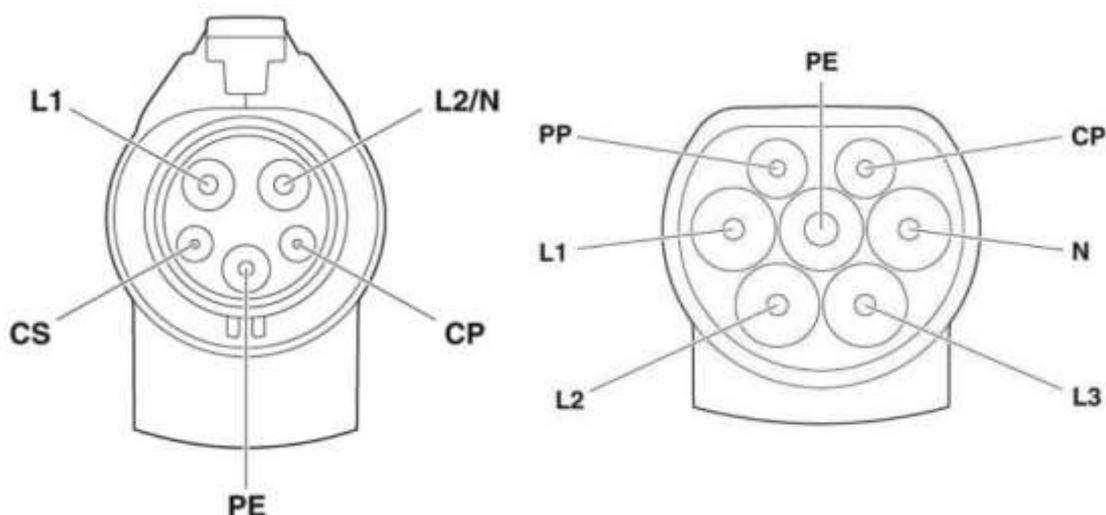


Рис. 66. Пятиштырьковый разъём Типа 1 SAE J1772 (слева) и семиштырьковый разъём Типа 2 VDE-AR-E 2623-2-2 (справа), предназначенные для зарядки электромобиля от сети переменного тока. PE – защитное заземление, CP – управляющая линия, PP (CS) – датчик приближения (контактный датчик), N – нейтраль, L1, L2, L3 – фазы переменного напряжения

Для подключения электромобилей к станциям быстрой зарядки постоянного тока используются как универсальные, так и специализированные разъёмы.

К универсальным разъёмам относятся разъёмы типа 1 и типа 2, дополненные двумя дополнительными штырьками увеличенного сечения для силовых линий постоянного напряжения, расположенными снизу от разъёма переменного тока в специальной секции. Они называются

¹ Иногда называемый «Mennekes» по наименованию первой фирмы-изготовителя.

² Иногда называемый «Scame» по наименованию первой фирмы-изготовителя.

SAE J1772 (Combo 1) и CCS (Combo 2) (англ. *combined charging system* – объединённая система зарядки).

SAE J1772 (Combo 1) используется в Северной Америке, а CCS (Combo 2) – в Европе.

Технология CCS поддерживается такими производителями автомобилей, как Audi, BMW, Daimler, Chrysler, Ford, GM, Porsche и Volkswagen.

Кроме того, компания Tesla (США) использует разъём типа 2, переключающийся из режима подачи трёхфазного переменного тока (по четырём штырькам – L1, L2, L3 и N) в режим подачи постоянного тока на станциях «Supercharger» по этим же штырькам, но в спаренном варианте (штырьки L1 и L2 используются для подключения положительного полюса, а штырьки L3 и N – для отрицательного).

К специализированным разъёмам относятся:

- **тип 4** – 10-штырьковый разъём стандарта JEVs G105-1993 (англ. *Japan electric vehicle standard* – Японский стандарт электромобилей), более известный под торговой маркой CHAdeMO¹ (рис. 67). Основными её сторонниками являются японские автопроизводители, включая Toyota, Nissan, Mitsubishi, и японские промышленные гиганты, такие как Fuji Heavy Industries Ltd. и Tokyo Electric Power Co;
- **тип 5** – 9-штырьковый разъём стандарта GB/T 20110530², используемый некоторыми китайскими автопроизводителями.

¹ CHAdeMO – это аббревиатура от фр. «CHArge de MOve» – «заряжая движение». С другой стороны это игра слов: «O cha demo ikaga desuka» по-японски означает «Давайте выпьем чаю во время зарядки», что намекает на небольшое время, необходимое для зарядки электромобиля. Иногда называется «JARI/Терсо» по наименованию первой фирмы-изготовителя.

² Иногда называемый «Catarc» по наименованию первой фирмы-изготовителя.

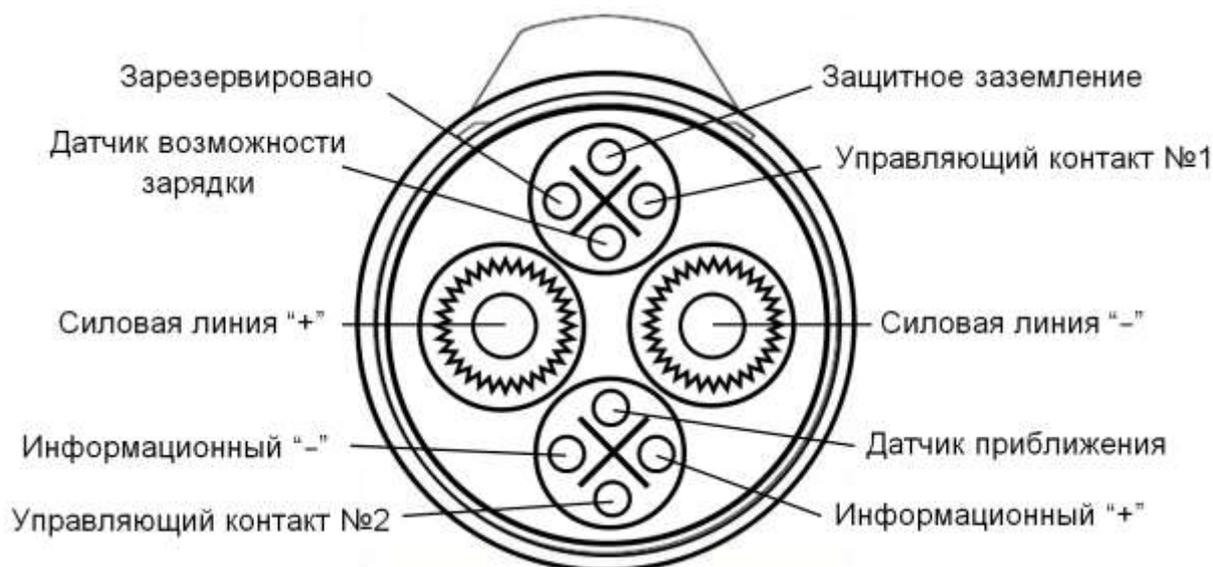


Рис. 67. Десятиштырьковый разъём CHAdeMO, предназначенный для быстрой зарядки электромобиля постоянным током

Беспроводная зарядка электромобилей

Беспроводная зарядка – это возможность передавать электроэнергию от электросети в автомобиль благодаря магнитному полю без механического контакта через слои воздуха и воды.

Принцип действия устройств беспроводной зарядки аналогичен принципу действия трансформатора: переменный по времени электрический ток, протекающий по обмоткам первичной катушки (передатчик), формирует изменяющееся магнитное поле. Это магнитное поле, достигая и проходя через обмотки вторичной катушки (приёмник), создаёт (индуцирует) в ней ЭДС. По мере удаления вторичной обмотки от первичной, всё большая часть магнитного поля не достигает вторичной обмотки, поэтому эффективность передачи снижается. Использование резонанса и изменение формы волны управляющего тока от синусоидальной до несинусоидальной несколько увеличивает дальность передачи.

При **магнитно-резонансной индукции** передатчик и приёмник настроены на одну частоту. Передающая и приёмная катушки, как правило, представляют собой однослойные соленоиды или плоскую спираль с набором конденсаторов, которые позволяют настроить принимающий элемент на частоту передатчика (рис. 68).

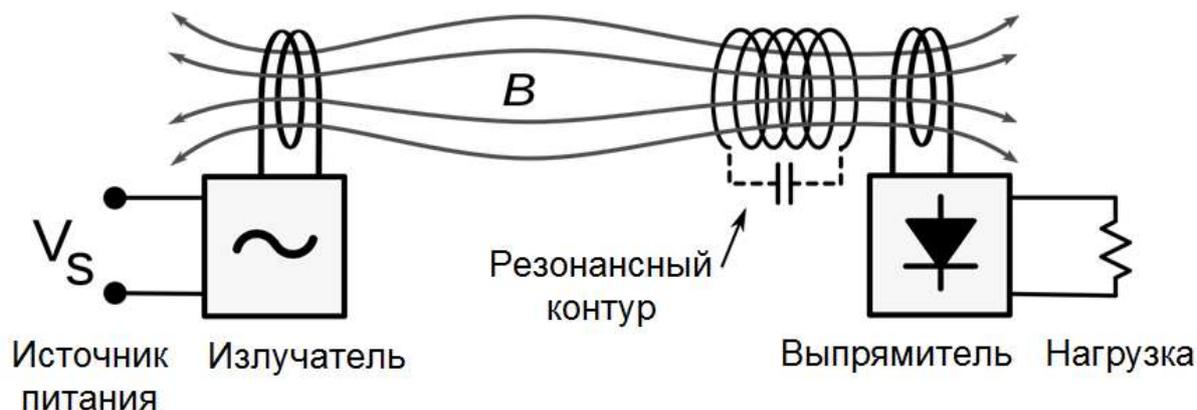


Рис. 68. Схема передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции

Сообщество автомобильных инженеров SAE в 2010 г. утвердило комитет по системам беспроводной передачи энергии. В январе 2016 г. комитет опубликовал черновой вариант стандарта SAE TIR J2954 «Беспроводная передача энергии и методология взаимного позиционирования оборудования для легковых электромобилей и подключаемых электрогибридов». В документе определяются критерии безопасности, эффективности и совместимости, а также процедуры испытаний.

Предусматривается использование рабочего диапазона частот 81,39...90 кГц и четырех уровней мощности, совместимых с режимами IEC 61851:

- WPT 1 – 3,7 кВт;
- WPT 2 – 7,7 кВт;
- WPT 3 – 11 кВт;
- WPT 4 – 22 кВт.

В 2018 году ожидается утверждение данного стандарта. Предполагается, что с этого момента начнется широкое внедрение систем беспроводной зарядки электромобилей.

Технология беспроводной зарядки уже коммерциализирована и предлагается в качестве опции для электромобилей и подключаемых гибридов (рис. 69). Кроме того, проводятся эксплуатационные испытания применения данной технологии для подзарядки городских электро- или гибридных автобусов на остановочных пунктах.

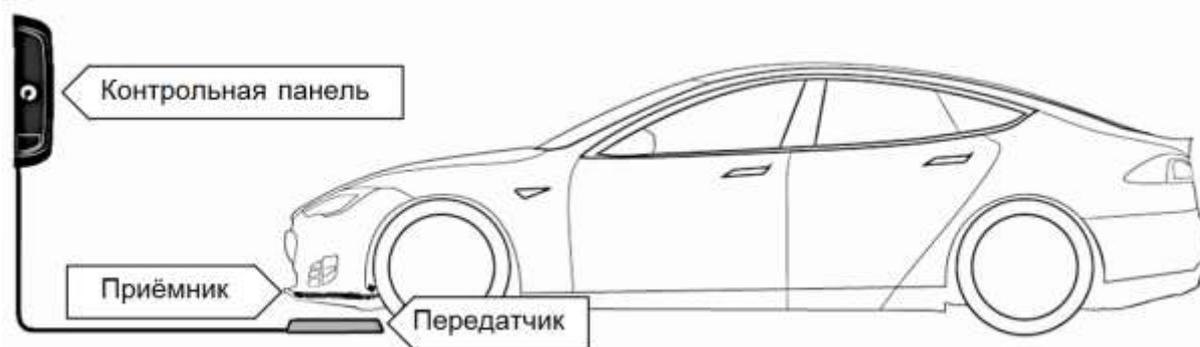


Рис. 69. Схема расположения оборудования для беспроводной зарядки электромобилей. Источник: *Evatran Group*

Основными преимуществами беспроводной зарядки являются удобство, надёжность, отсутствие износа. К недостаткам следует отнести более высокие по сравнению с кондуктивной зарядкой потери энергии (КПД индуктивной передачи составляет 70...90% в зависимости от расстояния между передатчиком и приёмником и их взаимного позиционирования) и стоимость оборудования, а также меньшую мощность.

Электромобили как часть новой энергетической системы

Экологические преимущества электромобилей будут проявляться всё в большей степени по мере экологизации энергетической системы. Энергетика стран, проявляющих заботу о будущем, быстро изменяется как в направлении использования более эффективного «традиционного» генерирующего оборудования, так и в направлении развития новых возобновляющихся «альтернатив», таких как фотогальванические преобразователи, ветрогенераторы и т.п. Поскольку эти альтернативы характеризуются относительно малой мощностью, непостоянством выработки электроэнергии по времени и децентрализацией размещения, требуется радикальное изменение в характере распределения и управления электрическими распределительными сетями.

Умные сети электроснабжения (англ. *smart grid*) – это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей

автоматически повышать эффективность, надёжность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии. Развитие технологии умных сетей также означает фундаментальную реорганизацию рынка услуг электроэнергетики, несмотря на то, что терминология на первый взгляд предполагает только развитие технической инфраструктуры.

Технологии «умных сетей» включают передовые датчики, известные под названием «модулей измерений фазора¹» (англ. *phasor measurement units, PMUs*), которые позволяют операторам оценивать стабильность работы сети, передовые «цифровые» системы измерения электроэнергии, дающие потребителям исчерпывающую информацию и автоматически оповещающие о сбоях, реле, автоматически определяющие и восстанавливающие сбои на подстанциях, а также перенаправляющие электроэнергетические потоки в обход проблемных участков и накопители, которые позволяют запасать избыточную энергию и подавать её в сеть при необходимости.

Электромобили прекрасно вписываются в модель новой децентрализованной и «умной» энергосистемы. С одной стороны, для зарядки множества электромобилей потребуются дополнительные мощности. Но с другой стороны, электромобили, подключённые к зарядной инфраструктуре, становятся её частью, позволяя повысить гибкость управления энергопотоками за счёт использования бортовых накопителей электроэнергии как части общей сетевой накопительной ёмкости. Исследования показывают, что большую часть времени суток частные электромобили стоят на парковках в подключённом к сети состоянии и с полностью заряженным бортовым накопителем энергии. Поэтому их можно использовать для выдачи энергии в сеть при необходимости покрытия пиковых нагрузок или в аварийных/чрезвычайных ситуациях. Владельцы электромобилей могли бы даже получать от этого прибыль. Также следует учитывать возможность «перевода» подержанных бортовых накопителей энергии,

¹ Фазор – комплексное число, представляющее одновременно величину и относительный угол волн напряжения и силы тока. Помимо собственно фазора, PMUs измеряют ассоциированную частоту и мощность. Синхронизация данных происходит по сигналу GPS.

уже не обеспечивающих требуемого запаса хода электромобиля, в разряд стационарных накопителей, продляя их срок полезного использования.

Кроме того, управляя процессом зарядки электромобилей, например, осуществляя зарядку большинства электромобилей в ночное время, можно сгладить пиковые потребности в электроэнергии.

Контрольные вопросы по разделу

1. Какие существуют разновидности альтернативных приводов автомобилей?
2. Из каких подсистем состоит система привода батарейного электромобиля?
3. Какие типы компоновочных схем используются при проектировании батарейных электромобилей? Каковы их преимущества и недостатки?
4. Объясните принцип работы топливного элемента с протоно-обменной мембраной.
5. Перечислите и поясните преимущества и недостатки топливных элементов в качестве источника энергии для электромобилей.
6. Что называют солнцемобилем? Где используются солнцемобили? Какие факторы препятствуют их более широкому распространению?
7. Что называется гибридным приводом? Какие существуют типы гибридных приводов? Каковы причины появления гибридных приводов?
8. Какие варианты потоков энергии возможны в гибридном приводе?
9. Каким образом осуществляется декомпозиция мощности сопротивления движению автомобиля на среднюю и динамическую составляющие? Как это связано с выбором агрегатов гибридного привода?
10. Как классифицируются различные конструкции гибридных приводов?
11. За счёт чего обеспечивается улучшение энерго-экологических характеристик гибридных автомобилей?
12. Опишите работу последовательного гибридного привода. Перечислите его преимущества и недостатки, области применения.

13. Опишите работу параллельного гибридного привода. Перечислите его преимущества и недостатки, области применения.
14. Опишите работу гибридного привода с разделением потока мощности ДВС. Перечислите его преимущества и недостатки, области применения.
15. Опишите работу гидравлического гибридного привода. Перечислите его преимущества и недостатки, области применения.
16. Какие типы гидромашин и гидроаккумуляторов применяются в гидравлических гибридах?
17. Опишите работу пневмогибридного привода на основе «двигателя с разделённым циклом» Scuderi. Перечислите его преимущества и недостатки.
18. Опишите работу пневмогибридного привода на основе пневмодвигателя MDI. Перечислите его преимущества и недостатки.
19. Опишите работу механической маховичной системы рекуперации энергии торможения. Перечислите её преимущества и недостатки.
20. Опишите работу электромеханической маховичной системы рекуперации энергии торможения. Перечислите её преимущества и недостатки.
21. Приведите классификацию наиболее распространённых электромоторов для электромобилей и электрогибридов.
22. Нарисуйте типичную характеристику электромотора для электромобилей, укажите наиболее распространённые области (режимы) работы в реальной эксплуатации.
23. Объясните принцип действия коллекторного электромотора постоянного тока. Перечислите его преимущества и недостатки.
24. Объясните принцип действия бесколлекторного индукционного (асинхронного) электромотора. Перечислите его преимущества и недостатки.
25. Объясните принцип действия бесколлекторного синхронного электромотора с обмоткой в роторе. Перечислите его преимущества и недостатки.
26. Объясните принцип действия бесколлекторного синхронного электромотора с постоянными магнитами в роторе. Перечислите его преимущества и недостатки.

27. Перечислите типы материалов для изготовления постоянных магнитов, их характеристики.
28. Объясните принцип действия бесколлекторного синхронного электромотора с магнитным сопротивлением в роторе. Перечислите его преимущества и недостатки.
29. Объясните принцип работы электрохимической ячейки. Перечислите основные электрические параметры электрохимических ячеек.
30. Что называют перенапряжением электрохимической ячейки? От каких факторов оно зависит?
31. Перечислите и объясните основные характеристики аккумуляторных батарей.
32. Объясните принцип действия Ni-Cd-аккумулятора. Перечислите его преимущества и недостатки.
33. Объясните принцип действия Ni-MH-аккумулятора. Перечислите его преимущества и недостатки.
34. Объясните принцип действия Li-Pol- и Li-Ion-аккумуляторов. Перечислите их преимущества и недостатки.
35. Объясните принцип действия суперконденсатора с двойным электрическим слоем. Перечислите его преимущества и недостатки.
36. Перечислите проблемы, затрудняющие быструю зарядку аккумуляторов.
37. Охарактеризуйте стандартные режимы кондукторной (проводной) зарядки электромобилей.
38. Перечислите существующие разновидности разъёмов для подключения электромобилей к зарядным станциям.
39. Объясните принцип действия беспроводной магнитно-резонансной зарядки электромобилей. Перечислите её преимущества и недостатки.
40. Каким образом электромобили взаимодействуют с «умными» сетями электроснабжения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активная природоохранная деятельность, начавшаяся после проведения первой конференции ООН в 1972 г., привела к появлению множества инженерных решений, инноваций, технологий, направленных на улучшение энерго-экологических характеристик машин и оборудования во всех сферах человеческой деятельности. В транспортной отрасли, ответственной за существенную долю негативного антропогенного воздействия, усилия специалистов привели к совершенствованию конструкций средств транспорта, позволившему существенно сократить показатели их удельного негативного воздействия на окружающую среду. Однако общий уровень негативного экологического воздействия от транспорта изменяется неоднозначно. Если суммарное количество выбросов токсичных ЗВ от транспорта, таких как CO, CH, NO_x, ДЧ, SO₂, показывает устойчивую динамику на снижение, то суммарное количество потребляемой энергии и связанных с ней выбросов CO₂, увеличивается. Также увеличивается объём потребляемых ресурсов и образующихся отходов, растёт негативное акустическое, вибрационное, электромагнитное воздействие, продолжается процесс отчуждения и фрагментации территорий, усиливаются другие виды негативного воздействия. Такая ситуация связана с интенсивным ростом транспортной деятельности, мобильности населения и экономики. Технологические улучшения в принципе не обеспечивают компенсации этого процесса. Поэтому наряду с ними необходимо принимать меры общеполитического характера, направленные на реализацию концепции экологически устойчивого развития человеческой цивилизации, принятой в 1992 г. на второй конференции ООН по окружающей среде и развитию.

Тем не менее поиск новых инженерных решений по минимизации негативного воздействия транспорта на окружающую среду продолжается, и данное учебное пособие позволяет определить основные направления этого процесса, понять суть уже существующих технологий, их место в номенклатуре природоохранных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Звонов В.А.* Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
2. Nitrogen Oxides, Why and how they are controlled? / U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Technical Bulletin EPA-456/F-99-006R, 1999.
3. *Гиринович М.П.* Исследование процессов образования оксидов азота при сгорании топлив в перспективных дизелях. Доклад по дисс. к.т.н., М.: МАДИ (ГТУ), 2006 г.
4. *Сомов В.А., Боткин П.П.* Топливо для транспортных дизелей. – М.: Судпромгиз, 1963. – 356 с.
5. *Zeldovich I.* The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions / Acta Physicochem. URSS, 21:577, 1946.
6. *Lavoie G.A., Heywood I.B. and Keck I.C.* Experimental and Theoretical Investigation of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines / Combust. Sci. Technol., 1:313-326, 1970.
7. *Drake M.C., and Blint R.J.* Calculations of NO_x Formation Pathways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH₄/Air Flames / Combust. Sci. Tech. 75:261-285, 1991.
8. *Lavoie G.A., and Blumberg P.N.* Measurements of NO Emissions from a Stratified Charge Engine: Comparison of Theory and Experiment / Combust. Sci. Tech. 8:25-37, 1973.
9. *Lavoie G.A., and Blumberg P.N.* A Fundamental Model for Predicting Fuel Consumption, NO_x and HC Emissions of the Conventional Spark-Ignition Engine / Combust. Sci. Tech. 21:225-258, 1980.
10. *Прохоров В.Б., Роголев Н.Д.* Исследование загрязнения приземного слоя воздуха г. Москвы от вредных выбросов тепловых электрических станций / Доклад на Международной научно-практической конференции «Экология энергетики». М.: МЭИ, 2000.
11. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
12. *Papa L.J.* Gas Chromatography – Measuring Exhaust Hydrocarbons Down to Parts Per Billion / SAE Paper 670494, 1967. – 21 p.
13. Handbook of air pollution from internal combustion engines: pollutant formation and control / edited by Eran Sher. Academic Press, 1998. – 663 p.
14. *Брозе Д. Д.* Сгорание в поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1969. – 247 с.
15. *Рудин М. Г., Дробкин А. Е.* Краткий справочник нефтепереработчика. – М.:Химия, 1980. – 328 с.

-
16. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение / Под ред. проф. Б.В. Лосикова, – М.:Химия, 1966.
 17. Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту».
 18. Протокол по стойким органическим загрязнителям к Конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/persist.pdf (дата обращения: 26.03.16).
 19. Федеральный закон от 22.03.2003 N 34-ФЗ «О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации».
 20. Справочник химика. Химия и химическая технология. URL: <http://chem21.info/info/822400> (дата обращения: 26.03.16).
 21. ГОСТ ISO 817-2014 Хладагенты. Система обозначений.
 22. Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer – 7th Edition / Ozone Secretariat United Nations Environment Program, 2006.
 23. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, IPCC, 2013. – 1535 pp.
 24. ГОСТ 25005-94 Оборудование холодильное. Общие требования к назначению давлений.
 25. Правила № 49 ЕЭК ООН Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц двигателями с воспламенением от сжатия и двигателями с принудительным зажиганием, предназначенными для использования на транспортных средствах.
 26. *Tami C. Bond Climate Science and Major Sources // U.S. EPA Region 9 – Black Carbon Symposium – November 14, 2012.*
 27. *Теснер П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. – М.: Химия, 1972. – 136 с.*
 28. *Broome D. and Khan I. M. The Mechanisms of soot release from combustion of hydrocarbon fuels with particular reference to the diesel engines. – Conference on Air Pollution Control in Transport Engines, Paper 140/71. London, November, 1971.*
 29. *Воинов А. Н. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.*
 30. *MacFarlane J. J., Holderness F. S., Whitcher F. S. Soot Formation Rates in Premixed C₅, C₆ Hydrocarbon – Air Flames at Pressure up to 20 Atmospheres // Combustion and Flame. – Vol. 8, 1964. – P. 215 – 229.*

-
31. *Гаврилов Б. Г.* Химизм предпламенных процессов в двигателях. – Л.: ЛГУ, 1970. – 182 с.
32. *Гуреев А. А., Махов В. З., Ховах М. М.* Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование // Тр. МАДИ, 1975, Автотракторные двигатели внутреннего сгорания. – Вып. 92. С. – 29 - 38.
33. *Махов В. З., Ховах М. С.* Исследование влияния присадок к топливу на процесс образования и сгорания сажи в цилиндре дизеля // В кн.: Снижение загрязнения воздуха в городе выхлопными газами автомобилей. – М.: НИИНавтопром, 1971. – С. 111 – 118.
34. *Fenimore C. P. and Jones G. W.* Coagulation of Soot to Smoke in Hydrocarbon Flames / Combustion and Flame. – Vol. 13, 1969. P. 303 – 310.
35. *Варшавский И. Л., Мачульский Ф. Ф.* Токсичность дизельной сажи и измерение сажесодержания дизельного выхлопа // Тр. ЛАНЭ. М.: Знание, 1969. – С. 120 – 157.
36. *Kittelson, D.B.* Engines and nanoparticles: A review / J. Aerosol Sci., 29(5/6), 1998. – P. 575 – 588.
37. *Шелмаков С.В.* Повышение эффективности и экологической безопасности городского автобуса путём согласования режимов работы двигателя и агрегатов трансмиссии / Дисс. К.т.н. М.: МАДИ, 1995.
38. *Луканин В.Н., Трофименко Ю.В.* Промышленно-транспортная экология: учебник для вузов / под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2003. – 273 с.
39. *Councell, T.B., Duckenfield, K. U., Landa, E. R., Callender, E.* Tire wear particles as a source of zinc to the environment / Environmental Science and Technology, Vol. 38, 2004. – P. 4206 – 4214.
40. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов 2009 (Износ покрышек и тормозов дорожных транспортных средств, износ дорожного покрытия). URL: <http://www.eea.europa.eu> (дата обращения: 26.04.17).
41. Emissions Inventory of PM_{2.5} Trace Elements across the United States / Environ. Sci. Technol., 43 (15), 2009. – P. 5790 – 5796.
42. «Green» tyres. URL: <http://www.sciteclibrary.ru/textsts/eng/analit/an029.htm> (дата обращения: 26.04.17).
43. *Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A., Groblicki, P.J., Laroo, Ch., Parr, G.A.* Brake Wear Particulate Matter Emissions / Environmental Science and Technology, Vol. 34, 2000. – P. 4463 – 4469.
44. *Sanders, P. G., Xu, N., Dalka, T. M., Maricq, M. M.* Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests / Environmental Science and Technology, Vol. 37, 2003. – P. 4060 – 4069.
45. *Lohrer W., Mierheim L. W.* Staub-Reinhalt / Luft, Vol. 43, 1983. – P. 78 – 83.
46. Compilation of air pollutant emission factors / USEPA Report AP-42, Volume I, 5th edition. USEPA, 1995.

-
47. *Berdowski, J., Visschedijk, A. J. H., Creemers, E.; Pulles, T., Pacyna, J., Fudala, J., Querreveld, D.* / CEMPMEIP database particulate matter 1995. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn, The Netherlands. 2001.
48. *Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A., Groblicki, P.J., Laroo, Ch., Parr, G.A.* Brake Wear Particulate Matter Emissions / *Environmental Science and Technology*, Vol. 34, 2000. – P. 4463 – 4469.
49. *Abu-Allaban, M., Gillies, J.A., Gertler, A.W., Clayton, R., Proffit, D.* Tailpipe, resuspended road dust, and brake wear emission factors from on-road vehicles / *Atmospheric Environment*, Vol. 37(1), 2003. – P. 5283 – 5293.
50. *Schneider J., Hock N., Weimer S., Borrmann S., Kirchner U., Vogt R., Scheer V.* Nucleation particles in diesel exhaust: Composition inferred from in situ mass spectrometric analysis. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 39(16), 2005. – P. 6153 – 6161.
51. *Kopa R. D., Jewell R. G., Spangler R. V.* Effect of Exhaust Gas Recirculation on Automotive Ring Wear / SAE Paper S. 321, 1962. – 9 p.
52. *Басс Б. А.* Повышение топливной экономичности бензиновых двигателей увеличением энергии источника искрового зажигания. Дисс. канд. технических наук: 05.04.02. – М.: РГБ, 2007. – (Из фондов Российской государственной библиотеки).
53. Требования к системам зажигания – основные параметры. URL: <http://elektrikavto.by/spravochnik/15-sistema-zazhiganiya/39-trebovaniya-k-sistemam-zazhiganiya-osnovnyye-parametry.html> (дата обращения: 26.04.17).
54. *Морозов Г.* Прогрессивные системы зажигания // Катера и яхты № 113. – 1985.
55. *Мацкерле Ю.* Современный экономичный автомобиль / пер. с чешск. В. Б. Иванова; под ред. А. Р. Бенедиктова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
56. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / *Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин* и др.; под ред. *А.С. Орлина, М. Г. Круглова.* – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. - 372 с.
57. Анализ путей уменьшения токсичности дизелей / *В.А. Звонов, Е.И. Боженко, А.П. Дядин* и др. // В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: ХГУ, 1976. Вып. 24. С. 115 – 124.
58. Системы управления бензиновыми двигателями / пер. с немецкого. Первое русское издание. – М.: ООО Книжное издательство «За рулём», 2005. – 432 с.
59. *Hagen D. F., Holiday G. M.* The Effects of Engine Operating and Design Variables on Exhaust Emissions / SAE Paper 486C, 1962. – 41 p.
60. *Scheffler Ch. E.* Combustion Chamber Surface Area, a Key to Exhaust Hydrocarbons / SAE Paper 660111, 1966. – 13 p.

-
61. Применение цикла Аткинсона в новых моторах Toyota. URL: http://rosavto42.ru/content/public/joker_content/joker_content2/tcycle_atkinson.html (дата обращения: 16.04.17).
62. Homogeneous charge compression ignition. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Homogeneous_charge_compression_ignition (дата обращения: 16.04.17).
63. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / *О.И.Жегалин, Н.А.Китросский, В.И.Панчишный* и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
64. *Дэниэлс Дж.* Современные автомобильные технологии. – М.: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2003. – 223 с.
65. *Каменев В.Ф.* Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием / Диссер. на соискание учёной степени д.т.н. М.: ГНЦ НАМИ. – 1995.
66. Автомобильный справочник / пер. с англ. Первое русское издание. – М.:Издательство «За рулём», 1999. – 896 с.
67. *Favre C., May J. & Bosteels D.* Emission control technologies to meet current and future European vehicle emissions legislation. – URL: www.aecc.eu (дата обращения: 16.06.16).
68. Perfectly Adapted ISB Euro 6 Diesel Engines 150 – 310 PS. – URL: www.cumminsengines.com (дата обращения: 26.05.16).
69. *Glueck K.H., Goebel U., Hahn H., Hoehne J.* Die Abgasreinigung deer FSI-Motoren (Fuel Stratified Injection) von Volkswagen / MTZ, 6, 2000. P. 402 – 412.
70. State of Technology Review – Algae Bioenergy / An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. Published by IEA Bioenergy: Task 39: January 2017.
71. ГОСТ 27577–2000 «Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия».
72. ГОСТ Р 56021–2014 «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия».
73. *Куценко С. А.* Основы токсикологии / С. А. Куценко. – СПб.: Фолиант, 2004.
74. EBRD Methodology for Assessment of Greenhouse Gas Emissions, Version 7, 6. EBRD, July 2010.
75. *Абрамович А.Д., Березовский С.И., Вержбицкий Н.Ф.* и др. Гл. ред. акад. *Чудаков Е.А.* Машиностроение. Энциклопедический справочник. В 15 томах. Том 10. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1948.
76. José Luis Pérez Souto IVECO LNG Vehicles. Innovation Truck & Bus / Alternative fuels. TrainMoss II, Madrid, 26-11-2015.
77. *Brachmann T., Yatabe F.* The Natural Gas Honda Civic GX, an Unique Clean Vehicle for today and the 21 Century / Proceedings of NGV-98.

-
78. *Стриженов Е.М.* Разработка и исследование энергоэффективных процессов адсорбционного аккумулирования метана / Автореф. дисс. к.т.н. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
79. *Marco-Lozar J.P.* [et al.] Gas storage scale-up at room temperature on high density carbon materials // *Carbon*. 2014. Vol. 76. P. 123 – 132.
80. *Shao X., Wang W., Zhang X.* Experimental measurements and computer simulation of methane adsorption on activated carbon fibers // *Carbon*. 2007. Vol. 45. P. 188 – 195.
81. *Chandler K.L., Gifford M.T., Carpenter B.S.* Resource Guide for Heavy-Duty LNG Vehicles, Infrastructure, and Support Operations. Final report. – Battelle, March, 2002.
82. ГОСТ Р 52087–2003 «Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия».
83. *Autogas Incentive Policies / World LPG Association, Menecon Consulting, Paris, 2005.*
84. *Autogas Incentive Policies. A Country-by-Country Analysis of Why and How Governments Encourage Autogas and What Works / World LPG Association, 2016 Update.*
85. *Fuel-Cycle Emissions for Conventional and Alternative Fuel Vehicles: An Assessment of Air Toxics / Argonne National Laboratory Center for Transportation Research, US DOE, Chicago, 2000.*
86. *Regression modeling of oxyfuel effects on ambient CO concentrations. Final Report / Systems Applications International, Inc., 1997.*
87. *Oxygenated factbook. A compilation of information on the benefits of oxygenates in gasoline / Clean Fuels Development Coalition. – URL: www.cleanfuelsdc.org (дата обращения: 28.06.2017).*
88. *The Blue Ribbon Panel on Oxygenates in Gasoline. Executive Summary and Recommendations. Final Report, July 27, 1999.*
89. *Metyl-tert-butyl ether (Group 3) - Summaries & Evaluations / International Agency for Research on Cancer (IARC). VOL. 73, 1999.*
90. *Achieving Clean Air and Clean Water: The Report of the Blue Ribbon Panel on Oxygenates in Gasoline / EPA 420-R-99-021 September 15, 1999.*
91. *Tert-butyl methyl ether (MTBE). European Union Risk Assessment Report / Institute for Health and Consumer Protection. European Chemicals Bureau. Existing Substances. 3rd Priority List. Volume 19. European Communities, 2002.*
92. *Смирнов В.А.* МТБЭ сегодня: комментарии НИИ «Ярсинтез». – URL: Newchemistry.ru (дата обращения: 28.06.2017).
93. *2-Metoxy-2-Methylbutane (TAME) European Union Risk Assessment Report / Institute of Health and Consumer Protection (IHCP) European Chemicals Bureau (ECB) 4th Priority List. Volume 70, 2006.*

-
94. Бензин. Метилтретбутиловый эфир. – URL: <http://e-him.ru/> (дата обращения: 28.06.2017).
95. *Каменев В.Ф.* Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием / Дисс. на соискание учёной степени д.т.н. – М.: ГНЦ НАМИ. – 1996.
96. Неотложная помощь при острых отравлениях: справочник по токсикологии / под ред. *Голикова С.Н.* – М.: Медицина, 1977. – 105 с.
97. Climate of Opportunity. 2010 Ethanol Industry Outlook / Renewable Fuels Association. – URL: www.EthanolRFA.org (дата обращения: 28.06.2017).
98. Ethanol & Rural Development / An Ethanol Across America White Paper, 2006.
99. The Impact of Ethanol Production on Food, Feed and Fuel / A Publication of Ethanol Across America, 2008.
100. Спиртовые топлива – URL: <http://autom.boom.ru>. (дата обращения: 28.06.2017).
101. E85 and Flex Fuel Vehicles / Office of Transportation and Air Quality. EPA-420-F-10-010, February 2010.
102. Системы управления дизельными двигателями / пер. с нем. Первое русское издание. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.
103. Net Energy Balance of Ethanol Production / A Publication of Ethanol Across America, 2004.
104. Ethanol & Energy / An Ethanol Across America White Paper, 2005.
105. *Huang H., Hui L. and Yi-Ru G.* Genetic Modification of Critical Enzymes and Involved Genes in Butanol Biosynthesis from Biomass / *Biotechnology Advances* 471.1, 2010.
106. *Dürre P.* Biobutanol: An Attractive Biofuel / *Biotechnology Journal* 2.12, 2007. P. 1525 – 1534.
107. Tert-butanol. Health and safety guide / IPCS international program on chemical safety. Health and Safety Guide No. 7. United Nations environment program. International Labor Organization. World Health Organization. Geneva, 1987.
108. *Zerbi N., Tyson K. S.* Biodiesel – the Clean, Green Fuel for Diesel Engines / U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory. DOE/GO-102000-1048, 2000.
109. *Вергунова Н. Г.* Справочник нефтехимика / под ред. С. К. Огородникова, – Л., 1978. – Т. 2. – 249 с.
110. *Васильев В.* Диметиловый эфир. Надежды конструкторов, водителей и экологов. / Основные средства, 2007 – № 1.
111. *Семененко К.Н.* Водородная энергетика: миф или реальность? // Вестник Российской Академии наук, 1993. – Т. 63. – №10. – С. 885 – 888.

-
112. Радченко, Р. В. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
113. Биотехнологическое получение водорода. – URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 06.06.17).
114. ГОСТ Р 54114–2010. Передвижные устройства и системы для хранения водорода на основе гидридов металлов.
115. Fulfilling the Potential of Fuel Cell Electric Vehicles. The Impact of Hydrogen Production Methods on Global Warming Emissions / Union of Concerned Scientists (UCS), 2015.
116. How clean are hydrogen fuel cell electric vehicles? New hydrogen-powered cars produce substantially less global warming emissions than their gasoline counterparts / Cambridge, MA. Union of Concerned Scientists (UCS), 2014.
117. BMW Hydrogen 7 Emissions Well-below Super-ultra Low-emission Vehicle Standards / Government Tests Confirm, 2008.
118. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design. Second edition. – CRC Press, 2010. – 558 p.
119. Ji M. and Wei Z. A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells / Energies 2009. – URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/2/4/1057/htm> (дата обращения: 08.06.16).
120. Russ J. New Frontiers in Solar Cell Conversion Efficiency / Spectrolab, Inc., 2009.
121. Схиртладзе А. Г., Иванов В. И., Кареев В. Н. Гидравлические и пневматические системы. – Изд. 2-е, доп. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2003. – 544 с.
122. EATON Accumulators Catalog V-FIFI-MC003-E, 2005.
123. Progress Report on Clean and Efficient Automotive Technologies Under Development at EPA: Interim Technical Report EPA420-R-04-002, 2004. – 198 pp.
124. Патент на изобретение RU №2403413 С2. Воздушный гибридный двигатель с расщеплённым циклом. Патентообладатель: Scuderi Grup LLC (US). 21.11.2006.
125. Fairley P. Deflating the Air Car. – Электронный ресурс: http://spectrum.ieee.org/micro_cars (дата обращения: 08.06.16).
126. Schultz J.W. and Huard S. Comparing AC Induction with Permanent Magnet motors in hybrid vehicles and the impact on the value proposition / Parker Hannifin Corporation, 2013.
127. ГОСТ 17809-72 Материалы магнитотвёрдые литые. Марки.
128. MMPA Standard No. 0100-00 Standard Specifications for Permanent Magnet Materials. – Chicago: Magnetic Materials Producers Association. Retrieved 9 September 2015.

-
129. Багоцкий В. С. Основы электрохимии. – М.: Химия, 1988. – 400 с.
130. Пополов А.С. Солнечный транспорт. – М.: Транспорт, 1996. – 166 с.
131. О типах аккумуляторных батарей. О типах литий-ионных батарей. Электронный ресурс: <http://e4bike.ru/blogs/stati> Дата обращения: 08.06.16.
132. Ликбез по кислотным аккумуляторам. – URL: <http://sdisle.com/battery/index.html> (дата обращения: 08.06.16).
133. Неограниченная химия / под ред. акад. Ю.Д. Третьякова. Т. 3. Химия переходных элементов. – М.: Академия, 2004. – 368 с.
134. Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И. Применение лития, его сплавов и соединений в химических источниках тока (к 25-летию начала производства литий-ионных аккумуляторов) / Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 1(238), 2016. – С. 65 – 79.
135. Устройство суперконденсатора. – URL: <http://ultra-cap.ru/ultracapacitors/introduction> (дата обращения: 24.07.17).
136. *Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F.* Carbon properties and their role in supercapacitors / *Journal of Power Sources* 157, 2006. P. 11 – 27.
137. *Babel K., Jurewicz K.* KOH activated carbon fabrics as supercapacitor material / *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 65, 2004. P. 275 – 280.
138. ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013 Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования.
139. IEC 61851-21 (2001) Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 21. Требования к кондуктивным соединениям электромобилей с питанием переменным или постоянным током.
140. IEC 61851-23 (2014) Electric vehicle conductive charging system – Part 23: DC electric vehicle charging station.
141. ГОСТ Р МЭК 62196-1–2013 Вилки, штепсельные розетки, соединители и вводы для транспортных средств. Кондуктивная зарядка для электромобилей. Часть 1. Общие требования.
142. ГОСТ Р МЭК 62196-2–2013 Вилки, штепсельные розетки, соединители и вводы для транспортных средств. Кондуктивная зарядка для электромобилей. Часть 2. Требования размерной совместимости и взаимозаменяемости для штыревых разъемов и арматуры сети переменного тока.
143. ГОСТ Р МЭК 62196-3–2014 Вилки, штепсельные розетки, соединители и вводы для электромобилей. Кондуктивная зарядка электромобилей. Часть 3. Требования к совместимости размеров и взаимозаменяемости соединительных муфт с штырями и трубчатых муфт на постоянный и переменный/постоянный ток.