

3 руб.

Загрязнение окружающей среды отработавшими газами дизелей приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности животноводства, ухудшению качества кормовых растений, мясо-молочной продукции, снижению ценности садовых культур



СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В. А. ЛИХАНОВ  
А. М. САЙКИН

# СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

$\text{CH}_x$   $\text{CO}$   
 $\text{NO}_x$   $\text{SO}_2$   
 $\text{CO}_2$   $\text{C}$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| Список принятых сокращений . . . . .   | 3   |
| Предисловие . . . . .  | 4   |
| 1. Перспективы развития отечественного автотракторного дизелестроения . . . . .                | 6   |
| 2. Токсическая оценка вредных выбросов . . . . .   | 8   |
| 2.1. Источники выбросов . . . . .  | 8   |
| 2.2. Состав отработавших газов . . . . .   | 9   |
| 2.3. Основные компоненты отработавших газов и их токсичность . . . . .                         | 19  |
| 3. Нормирование токсичности . . . . .  | 24  |
| 3.1. Оценка загрязненности атмосферы отработавшими газами. . . . .                             | 24  |
| 3.2. Государственные и отраслевые нормы и стандарты. . . . .                                   | 31  |
| 4. Образование токсичных компонентов . . . . .   | 34  |
| 5. Влияние различных факторов на токсичность и дымность. . . . .                               | 46  |
| 5.1. Эксплуатационные и конструкционные факторы . . . . .                                      | 46  |
| 5.2. Параметры и регулировки топливной аппаратуры . . . . .                                    | 58  |
| 5.3. Топливо и масла . . . . .   | 67  |
| 6. Снижение токсичности и дымности. . . . .  | 73  |
| 6.1. Малотоксичные рабочие процессы . . . . .  | 73  |
| 6.2. Подача топлива на впуске . . . . .  | 85  |
| 6.3. Подача воды в цилиндры . . . . .  | 93  |
| 7. Классификация систем снижения токсичности и дымности. Основные требования к ним . . . . .   | 107 |
| 7.1. Теоретические основы . . . . .  | 107 |
| 7.2. Классификация систем снижения токсичности дизелей . . . . .                               | 112 |
| 7.3. Основные требования к системам снижения токсичности. . . . .                              | 116 |
| 8. Конструкционные особенности и основные параметры систем снижения токсичности . . . . .      | 117 |
| 9. Испытания дизелей на токсичность и дымность . . . . .                                       | 143 |
| 9.1. Методы и приборы газового анализа. . . . .  | 143 |
| 9.2. Применение теории планирования эксперимента . . . . .                                     | 151 |
| 10. Применение альтернативных топлив для снижения токсичности автотракторных дизелей . . . . . | 171 |
| Литература . . . . .   | 205 |

**В. А. ЛИХАНОВ**  
**А. М. САЙКИН**

# **СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**



МОСКВА ВО "АГРОПРОМИЗДАТ"  
1991

Редактор *С. А. Карпушин*Лиханов В. А., Сайкин А. М. **Снижение токсичности автотракторных дизелей.** — М.: Агропромиздат, 1991. — 208 с.: ил. ISBN 5-10-000789-3.

Рассказано о токсичности отработавших газов дизелей, устанавливаемых на тракторы и самоходные комбайны, их воздействии на окружающую среду при эксплуатации. Показано влияние эксплуатационных факторов на изменение токсичности и рассмотрены способы ее уменьшения путем изменения рабочего процесса и конструкции дизелей, а также за счет применения специальных систем и альтернативных топлив.

Для научных работников и конструкторов, занимающихся разработкой, испытанием и внедрением сельскохозяйственных дизелей.  
Таблиц — 33. Иллюстраций — 83. Библиография — 74 названия.

Considered are the problems of toxicity and environmental impact of exhaust gases from diesel engines of tractors and self-propelled combine harvesters. The book describes the effects of operating conditions on changes in toxicity. Presented are the potentialities of reducing the toxicity by way of modifying the diesel design and operating conditions as well as by the use of special systems and alternative fuels.

The book is intended for scientific workers and designers dealing with development, testing and introduction of agricultural diesel engines.

Лиханов Виталий Анатольевич  
Сайкин Андрей Михайлович

### СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Зав. редакцией *С. А. Карпушин*. Мл. редактор *А. И. Павловская*. Художник *В. П. Трифонов*. Художественный редактор *Н. А. Никонова*. Технический редактор *Л. И. Кувыркина*. Корректор *Г. В. Абагурова*

ИБ № 6092

Сдано в набор 31.10.90. Подписано в печать 21.02.91. Формат 60 × 88<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная № 2. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,74.  
Усл. кр.-отт. 13,1. Уч.-изд. л. 14,73. Изд. № 273. Тираж 2000 экз. Заказ № 940  
Цена 3 руб.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО "Агропромиздат", 107807, ГСП-6,  
Москва, Б-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата" Государственного  
комитета СССР по печати. 109033, Москва, Волочаевская, 40.

3703030000 — 184  
Л 035 (01) — 91 19-91

ISBN 5-10-000789-3

© В. А. Лиханов, А. М. Сайкин, 1991

а.с. — авторское свидетельство  
БП — бенз (а) пирен  
ВМТ — верхняя мертвая точка  
ВТЭ — водотопливная эмульсия  
град п.к.в. — градусы поворота коленчатого вала  
ДВС — двигатель внутреннего сгорания  
ДТ — дизельное топливо  
ЖН — жидкостный нейтрализатор  
КН — каталитический нейтрализатор  
КПД — коэффициент полезного действия  
КС — камера сгорания  
НИР — научно-исследовательская работа  
НМТ — нижняя мертвая точка  
ОГ — отработавшие газы  
ПАУ — полициклические ароматические углеводороды  
ПДК — предельно допустимая концентрация  
РОГ — рециркуляция отработавших газов  
РФС — расширенный фракционный состав  
СПГ — сжатый природный газ  
ССТ — система снижения токсичности  
ТА — топливная аппаратура  
ТНВД — топливный насос высокого давления  
ЦПГ — цилиндропоршневая группа

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для выполнения задач по значительному укреплению материальной базы сельского хозяйства, переводу его на индустриальную основу ведущая роль отводится тракторному и сельскохозяйственному машиностроению. Тракторы, комбайны и автомобили, предназначенные для сельского хозяйства, должны быть оборудованы дизелями с улучшенными показателями по топливной экономичности, токсичности и дымности отработавших газов (ОГ), ресурсу, расходу масла на угар и т.д.

Рост парка автотракторных и комбайновых дизелей, увеличение единичных мощностей и расширение сферы применения приведут к увеличению загрязнения атмосферы токсичными веществами ОГ дизелей, увеличению их вредного воздействия. Исследованиями установлено, что концентрация таких вредных веществ, как окислы азота ( $\text{NO}_x$ ), окись углерода (СО), сажа (С), углеводороды ( $\text{CH}_x$ ), в том числе полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), в атмосфере рабочих мест и в кабинах автомобилей и тракторов может в несколько раз превышать предельно допустимые нормы. Это отрицательно сказывается на здоровье работающих и в конечном счете приводит к снижению производительности труда. Загрязнение окружающей среды ОГ дизелей приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности животноводства, ухудшению качества кормовых растений, мясо-молочной продукции, снижению ценности садовых культур.

Решение вопроса снижения дымности и токсичности ОГ дизелей находится в противоречии с требованиями улучшения топливной экономичности, что вызвано различием в механизмах образования токсичных веществ и протеканием процессов смесеобразования и сгорания, обеспечивающих улучшение топливной экономичности. Успешное решение этой трудной, не имеющей однозначного решения комплексной проблемы требует от двигателестроительных заводов, отраслевых институтов и кафедр ДВС вузов обеспечить совместное проведение научно-исследовательских фундаментальных и прикладных работ с реализацией их результатов в производстве.

В настоящей книге подробно рассмотрены пути снижения токсичности и дымности ОГ автотракторных дизелей, получившие наибольшее признание среди зарубежных и отечественных исследователей, освоенных в серийном производстве, а также перспективных, по которым ведется интенсивный поиск.

Исследование обширного фактического материала и приводимых данных позволит проектировщикам тракторов, двигателей, систем снижения токсичности, а также предприятиям, изготавливающим и эксплуатирующим сельскохозяйственную технику, технически грамотно и обоснованно решать вопросы снижения загрязнения атмосферы от вредных выбросов автотракторных и комбайновых дизелей.

Книга является обобщением отечественного и зарубежного опыта по данной проблеме. В ней нашли отражение также работы по исследованию путей снижения токсичности и дымности ОГ дизелей, проводимые авторами в НПО "НАМИ" и Кировском сельскохозяйственном институте.

\* \*  
\*

Авторы искренне благодарят рецензентов книги докторов технических наук, профессоров Варшавского Л. И. и Гурвича И. Б. за ценные замечания и советы, сделанные при подготовке рукописи, а также специалистов тт. Френкеля А. И., Сагалович А. В., Саржинова О. А., Попова В. М. и др., участвовавших в проведении ряда работ и обсуждении материала книги.

# 1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЯ

В постановлении Совета Министров СССР от 5 апреля 1989 г. для всех министерств и ведомств, изготовляющих машины и оборудование для АПК, определена главная задача – обеспечить в 1989–1995 гг. повышение в 2...3 раза надежности и улучшение качества машин и оборудования для сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности. Главным агрегатом всех мобильных машин является двигатель. Поэтому от его надежной работы во многом зависит работа машины в целом.

В соответствии с целевыми комплексными программами начиная с 1990 г. должен быть обеспечен выпуск двигателей с удельным расходом топлива на режиме номинальной мощности 220 г/кВт · ч при обязательном выполнении требований перспективных норм по токсичности и дымности ОГ ресурсом 12...15 тыс. ч с повышенной в 2...2,5 раза надежностью работы.

Прогнозы зарубежных специалистов по перспективам совершенствования топливной экономичности автотракторных дизелей при условии обязательного обеспечения перспективных требований по токсичности и дымности ОГ отражены в таблице 1.

Проблема улучшения топливной экономичности дизелей тесно переплетается со все возрастающими требованиями снижения токсичности и дымности ОГ. До введения в конце 70-х годов нормативных ограничений на выброс с ОГ токсичных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ), а также на дымность ОГ удельный выброс токсичных веществ с ОГ дизелей был высок и достигал по окислам азота 30,0...35,0 г/кВт · ч, по окиси углерода – 10,0...12,0 г/кВт · ч, по углеводородам – 5,0...8,0 г/кВт · ч, а дымность ОГ нередко превышала 60% по шкале дымомера Хартридж. В результате введения отраслевых и государственных стандартов по токсичности и дымности ОГ автотракторных дизелей, а также применения дифференцированного подхода к оценке удельного выброса токсичных веществ и дымности ОГ отдельно для комбайновых дизелей, в основном работающих в поле, для тракторных дизелей общего назначения – сельскохозяйственных и промышленных, эксплуатируемых во всех сферах сельскохозяйственного производства, и для дизелей, предназначенных для применения в условиях с ограниченным воздухообменом (животноводческие фермы, теплицы, внутрицеховые помещения, склады, хранилища и т.п.), был разработан и внедрен комплекс технических и

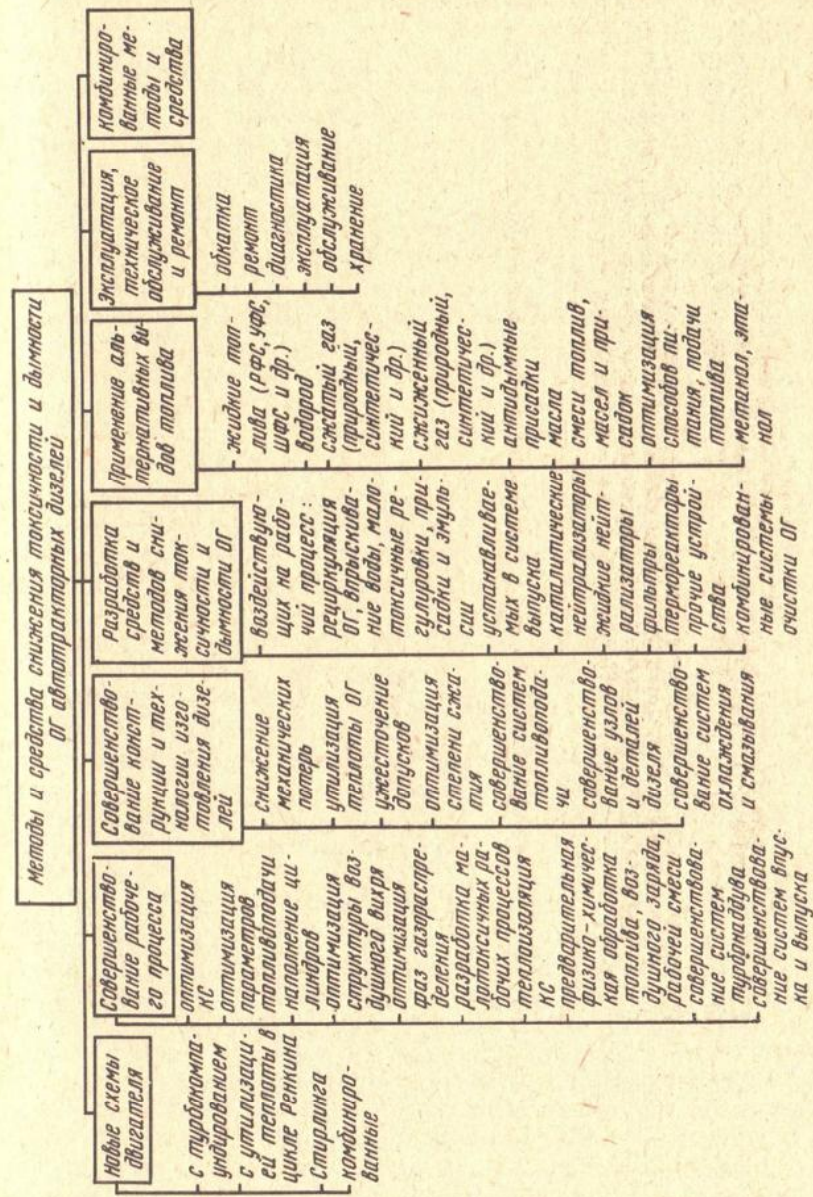


Рис. 1. Схема основных направлений и мероприятий по снижению токсичности и дымности ОГ автотракторных дизелей

организационных мероприятий, позволивший в среднем в 1,5 раза уменьшить токсичность и дымность ОГ дизелей, а их малотоксичных модификаций в 2...3 раза.

### 1. Перспективные показатели топливной экономичности дизелей

| Тип дизеля   | КПД, %  | Удельный расход топлива, г/кВт·ч | Годы внедрения              |
|--|---------|----------------------------------|-----------------------------|
| С турбонаддувом                                    | 36...38 | 220...235                        | Современные дизели<br>То же |
| С турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха | 37...39 | 205...225                        |                             |
| Усовершенствованные                                | 40...43 | 190...200                        | ”                           |
| Теплоизолированные                                 | 43...46 | 180...190                        | 1980...1993                 |
| Турбокомпаундные с силовой турбиной                | 48...52 | 165...175                        | 1989...1994                 |
| С пониженным трением                               | 52...56 | 150...165                        | 1992...1996                 |
| С утилизацией теплоты в цикле Ренкина              | До 60   | 140...150                        | К 2000                      |

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, наиболее эффективны и экономичны сочетания мероприятий по разработке и внедрению средств и методов снижения токсичности и дымности ОГ с вопросами повышения технического уровня двигателей. Образование токсичных компонентов находится в непосредственной зависимости от протекания рабочего цикла дизеля. Поэтому мероприятия, направленные на улучшение топливной экономичности, соответствующим образом будут изменять содержание в ОГ различных групп токсичных компонентов. Задача инженеров и научных сотрудников заключается в обосновании и практической реализации правильного сочетания принимаемых конструктивных и организационных мероприятий.

Основные направления научных исследований по снижению токсичности и дымности ОГ автотракторных и комбайновых дизелей представлены на рисунке 1.

Комплексное решение перечисленных направлений применительно к назначению и типу дизеля (с учетом его основных параметров, особенностей конструкции и реальных условий эксплуатации) позволит обеспечить решение основной задачи — снижение токсичности и дымности ОГ дизелей, используемых в сельскохозяйственном производстве.

## 2. ТОКСИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

### 2.1. ИСТОЧНИКИ ВЫБРОСОВ

Атмосферный воздух нашей планеты загрязняется токсичными веществами из различных источников. Сюда можно отнести газы и аэрозоли, образующиеся в антропогенных (связанных с человеческой деяте-

льностью) и естественных (космических и геологических процессов, продуктов жизнедеятельности живых организмов) источниках. По оценкам специалистов США, Японии, ФРГ и Швеции, транспортные и стационарные источники выбрасывают примерно равные количества токсичных веществ по массе. В СССР примерно 70% токсичных веществ падает на стационарные источники и лишь 30% на транспортные. Естественные источники выбрасывают в атмосферный воздух до 90,5% CO и CO<sub>2</sub>, до 74,3% CH<sub>4</sub>, 85% твердых частиц [1,54].

Почти все средства современного транспорта загрязняют атмосферу, однако большая часть из них падает на автомобили. Тысяча автомобилей в среднем дает за день 3200 кг CO и 200...400 кг других газообразных продуктов неполного сгорания топлива.

На дорогах мира движется более 250 млн автомобилей. Не меньшее количество токсичных компонентов выделяют тракторы, комбайны, другие самоходные транспортные средства. Только в СССР в сельском хозяйстве используется более 2,5 млн тракторов, а парк зерноуборочных комбайнов составляет около 800 тыс. Мощность тракторных, комбайновых и автомобильных двигателей в сельском хозяйстве составляет 386 млн кВт (525 млн л. с.).

Автотракторные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) загрязняют атмосферу вредными веществами, выбрасываемыми с ОГ, картерными газами и топливными испарениями.

До 95% токсичных компонентов, выделяемых с современными дизелями, падает на ОГ, представляющие собой аэрозоль сложного состава (до 1000 компонентов).

Второй источник загрязнений — картерные газы. Они образуются при смешивании части свежего заряда и ОГ, прорвавшихся через неплотности цилиндропоршневой группы из камеры сгорания в картер, с парами масла и топлива. Они выбрасывают значительное количество углеводородов в атмосферу (до 40%), так как их концентрация в 15...20 раз выше, чем в ОГ. В картерных газах основными токсичными компонентами являются NO<sub>x</sub> (45...80%) и альдегиды (до 30%). Доля картерных газов в дизеле не превышает 0,2...0,3% суммарного выброса токсичных веществ.

Третий источник загрязнения — топливные испарения. Испарения от карбюраторного автомобиля выше, чем от дизеля, и составляют от 4 до 12% выброса CH<sub>4</sub>.

### 2.2. СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Пока состав ОГ дизелей изучен менее подробно, чем состав ОГ бензиновых двигателей (табл. 2).

В общем случае содержание газообразных продуктов неполного сгорания топлива в ОГ (CO, CH<sub>4</sub>, RCHO) бензинового двигателя выше, чем в ОГ дизеля, содержание NO<sub>x</sub> у этих двигателей мало отличается, а дымность ОГ (сажесодержание) у дизеля гораздо выше. Можно отме-

## 2. Средний состав ОГ ДВС

| Компонент                          | Концентрация, %      |               | Примечание    |
|------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
|                                    | Бензиновый двигатель | Дизель        |               |
| Азот                               | 74...77              | 74...78       | Нетоксичный   |
| Кислород                           | 0,3...8,0            | 2,0...18      | "             |
| Водяной пар                        | 3,0...5,5            | 0,5...9,0     | "             |
| CO <sub>2</sub>                    | 5,0...12,0           | 1,0...12,0    | Малотоксичный |
| CO                                 | 0,5...12,0           | 0,005...0,4   | Токсичный     |
| NO <sub>x</sub>                    | 0,01...0,8           | 0,004...0,5   | "             |
| CH <sub>x</sub>                    | 0,2...3,0            | 0,009...0,3   | "             |
| РСНО (альдегиды)                   | 0...0,2              | 0,001...0,009 | "             |
| С (сажа), г/м <sup>3</sup>         | 0...0,04             | 0,01...1,1    | "             |
| Бенз (а) пирен, мкг/м <sup>3</sup> | 0,0...20,0           | 0,0...1,0     | "             |

тять две тенденции при изучении состава ОГ: определение группового состава и определение индивидуальных веществ. Работы первого направления позволяют подготовить и обосновать данные для нормирования и контроля содержания групп веществ при применении устройств, понижающих их количество в ОГ дизелей. Целью работ второго направления является изучение индивидуального состава ОГ дизелей, что позволяет обоснованно подойти к выбору средств и методов, обеспечивающих снижение их концентраций до заданного уровня.

Существуют и другие задачи, для решения которых недостаточно знания группового состава ОГ. Например, для анализа возможности удаления из них токсичных веществ какой-либо системой очистки важно знать свойства индивидуальных соединений (ГОСТ 12.1.005-76 и 12.1.007-76).

По своей природе отработавшие газы дизелей представляют собой сложную, многокомпонентную смесь газов, паров и капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Состав ОГ дизелей подобен составу ОГ других типов двигателей, использующих углеводородное топливо; отличие связано с разными условиями горения. При использовании углеводородных топлив нефтяного происхождения и атмосферного воздуха в качестве окислителя ОГ дизелей на 99...99,9% состоят из продуктов полного сгорания топлива (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O) и воздуха с пониженным содержанием кислорода.

Токсичность ОГ дизелей определяется в основном остальным 0,02...1% их объема, в который входят вещества, образующиеся в результате термического синтеза из воздуха при высоких температурах NO<sub>x</sub>, а также продукты неполного сгорания топлива (несгоревшие углеводороды, окись углерода, спирты, кетоны, кислоты, перекиси, сернистый ангидрид, частицы сажи, продукты конденсации и полимеризации). Кроме

продуктов сгорания топлива, в ОГ дизелей в существенно меньших количествах также присутствуют продукты сгорания смазочного масла, вещества, образующиеся из присадок к топливу и маслу, а также твердые частицы, в частности в ОГ бензиновых двигателей и дизелей найдены многочисленные элементы из материала конструкции двигателя (Fe, Ni, Cu, Zn, Cr).

Цвет отработавших газов дизелей изменяется от прозрачного через белый и синий до густого черного в зависимости от условий работы и состояния дизеля. Вследствие плохих условий воспламенения в процессе пуска (в некоторых случаях и при работе непрогретого двигателя на холостом ходу) ОГ содержат значительное количество несгоревших углеводородов, окрашивающих их в белый цвет (белый дым). При большом угаре масла ОГ могут быть окрашены в голубой цвет (голубой дым). При больших нагрузках в ОГ содержится значительное количество частиц сажи, окрашивающих их в черный цвет (черный дым). Кроме аэрозолей, ОГ могут содержать водяной туман, в котором растворяются их компоненты (например, SO<sub>3</sub> с образованием тумана серной кислоты).

В таблице 3 приведен количественный состав ОГ дизелей, полученный в результате обобщения материалов [1 и 54].

В работах некоторых ученых рассматриваются вопросы определения концентрации в ОГ дизелей полициклических ароматических углеводородов, многие из которых канцерогенны. Однако исследований по определению количественного содержания индивидуальных веществ и их групп встречается пока меньше, чем исследований по качественному их обнаружению. Исследователями определено содержание легких углеводородов в ОГ четырех дизелей: метан (2,9...7,9) · 10<sup>-6</sup>%; этилен (0,4...4,0) · 10<sup>-6</sup>%; ацетилен до 1,2 · 10<sup>-6</sup>%; пропилен до 1,3 · 10<sup>-6</sup>%. Известны данные по определению в ОГ четырех дизелей групп углеводородов (в мол. %): C<sub>12</sub> - 3,4...3,8; C<sub>12</sub> - C<sub>13</sub> - 14,0...14,2; C<sub>14</sub> - C<sub>15</sub> - 36,5...37,2; C<sub>16</sub> - C<sub>17</sub> - 26,3...37,2; C<sub>18</sub> - C<sub>19</sub> - 16,6...17,0; C<sub>20</sub> - 1,1...1,8.

В результате обобщения имеющихся материалов наряду с ранее широко известными для ОГ дизелей классами органических соединений (углеводородами, альдегидами, кетонами, кислотами, фенолами) выявлены менее известные (спирты, нитрофенолы, эфиры фенолов, сложные эфиры, гетероциклические соединения).

Кроме 10 классов органических соединений, в ОГ дизелей обнаружен также класс нитропиренов (нитропроизводные углеводородов), являющихся потенциальными канцерогенами. Нитропирены найдены вместе с бенз(а)пиреном в дихлорэтановом экстракте из выбросов частиц с ОГ дизелей [55].

Токсические характеристики для индивидуальных компонентов и их отдельных групп, содержащихся в ОГ, представлены в таблице 3; даны на основании [2, 3, 4, 55, 56, 57]; для классов углеводородов и

3. Количественный состав ОГ дизелей (о — общее токсическое действие; г — поражение зрительного нерва и сетчатки глаза, помутнение хрусталика, ожоги роговицы; к — канцерогенность; кт — яды, действующие на кроветворение; кя — кровяные яды, вызывающие изменения состава крови; н — наркотизми; нс — поражение нервной системы; ня — нервные яды, вызывающие судороги и параличи; п — поражение печени; ло — поражение почек; пт — поражение пищеварительного тракта; рс — раздражение слизистых оболочек глаза и дыхательных путей; с — участие в образовании смога; сс — поражение сосудистой системы; у — удушающее действие)

| Название (или класс) вещества                | Содержание, %                        | Качественная характеристика токсичности | Порог восприимчивости запаха, мг/л | Класс опасности | ПДК, мг/м <sup>3</sup> |           |
|--|--------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------|------------------------|-----------|
|  |                                      |   |                                    |                 | р.з.                   | м.р.      |
| Азот   | 74,0...78,0                          | —                                       | —                                  | —               | —                      | —         |
| Кислород                                     | 2,0...18,0                           | —                                       | —                                  | —               | —                      | —         |
| Двуокись углерода                            | 1,0...12,0                           | н, рс, у, сс                            | —                                  | —               | —                      | —         |
| Вода   | 0,5...9,0                            | —                                       | —                                  | —               | —                      | —         |
| Оксид углерода                               | 0,005...0,4                          | кя, нс                                  | —                                  | 4               | 20                     | 3,0       |
| Оксиды азота в пересчете на NO <sub>2</sub>  | 0,004...0,5                          | —                                       | 0,0002...0,008                     | 2               | 5                      | 0,085     |
| NO   | 0,004...0,5                          | кя, нс, п, кт                           | —                                  | —               | —                      | —         |
| NO <sub>2</sub>                              | 0,00013...0,013                      | рс, о, п                                | —                                  | —               | 2**                    | —         |
| Оксиды серы                                  | 0,005...0,05                         | —                                       | —                                  | —               | —                      | —         |
| SO <sub>2</sub>                              | 0,0018...0,02*                       | рс, кя, кт, п, г                        | 0,00087...0,003                    | 3               | 10                     | 0,5       |
| SO <sub>3</sub>                              | 2...3% от содержания SO <sub>2</sub> | рс, сс, нс                              | —                                  | 2               | 1                      | —         |
| Углеводороды в пересчете на C                | 0,009...0,3                          | с, рс, г, н, сс, кя, нс, кт, п, по      | 0,0007...0,6                       | 2...4           | 5...300                | 1,4...200 |
| в пересчете на C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | 0,00023...0,017*                     | —                                       | —                                  | —               | —                      | 1,0...25  |

Продолжение

| Название (или класс) вещества                            | Содержание, %                     | Качественная характеристика токсичности | Порог восприимчивости запаха, мг/л | Класс опасности | ПДК, мг/м <sup>3</sup> |                      |
|--|-----------------------------------|---|------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------------|
|  |                                   |   |                                    |                 | р.з.                   | м.р.                 |
| Альдегиды в пересчете на C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O | 1,0...10,0 мг/м <sup>3</sup>      | с, о, г, н, ня, нс, рс, п, по           | 0,00007...0,004                    | 2...3           | 0,2...5                | 0,01...3,0           |
| Формальдегид   | 0,0001...0,0019                   | о, рс, нс, п, по, с                     | 0,00007...0,0004                   | 2               | 0,5                    | 0,035                |
| Акролеин   | 0,00010...0,00013*                | рс, нс                                  | 0,00007                            | 2               | 0,2                    | 0,03                 |
| Бенз(а)пирен   | 0,05...1,0 мкг/м <sup>3</sup>     | к                                       | —                                  | 1               | 0,00015                | —                    |
| Сажа   | 0,28...0,63*** мкг/м <sup>3</sup> | —                                       | —                                  | —               | —                      | 1 · 10 <sup>-6</sup> |
|  | 0,01...1,10 г/м <sup>3</sup>      | —                                       | —                                  | 3               | 4****                  | 0,15                 |

\* По [54].

\*\* По [1] для любых продуктов сгорания.

\*\*\* По [55].

\*\*\*\* Значение ПДК<sub>р.з.</sub> для сажи относится к сажам черным промышленным с содержанием бенз(а)пирена не более 35 мг/га

1 кг.



альдегидов они получены обобщением значений для индивидуальных веществ.

Как отмечает И. В. Саноцкий, понятие "токсичность" (ядовитость) до сих пор страдало неопределенностью. Многие авторы под токсичностью склонны были понимать любое действие яда и даже, как это не бессмысленно, отсутствие его действия. Были предложения классифицировать степень токсичности по предельно допустимым концентрациям, т.е. по абсолютно безвредным концентрациям и, кроме того, взятым с запасом.

*Сущность явления токсичности определяется количественной характеристикой взаимоотношений между химическими компонентами внешней среды и организмом человека.*

Токсичность веществ (по определению И. В. Саноцкого) — это мера несовместимости веществ с жизнью организма. Почти все компоненты ОГ дизелей токсичны, но в разной степени. В таблице 3 даны качественная характеристика токсичности, порог восприятия запаха, предельно допустимые концентрации (ПДК) и класс опасности.

Определение порога восприятия запаха отсутствует в справочной литературе, по-видимому, в связи с тем, что эти значения, сообщаемые разными авторами, получены нестандартными методами и могут рассматриваться лишь как ориентировочные. Запах — трудно оцениваемый параметр. Измерение его органолептическим методом (с помощью людей-анализаторов) носит субъективный характер. Приведенный в некоторых случаях в таблице 3 интервал значений порога восприятия запаха связан с разной восприимчивостью к нему разных людей. Запах ОГ дизелей зависит от присутствия в них многих веществ. Химическая идентификация компонентов запаха ОГ дизелей пока еще не доходит до уровня отдельных соединений.

Опасность вещества (более широкое понятие, чем токсичность) — это вероятность возникновения и развития отравления в реальных условиях производства и применения.

В СССР установлена классификация вредных веществ по обобщенной количественной характеристике токсичности и опасности — классу опасности.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности: 1-й — вещества чрезвычайно опасные; 2-й — вещества высокоопасные; 3-й — вещества умеренно опасные; 4-й — вещества малоопасные.

Из веществ, содержащихся в ОГ, к первому классу опасности принадлежит только бенз(а)пирен; для других канцерогенных веществ класс опасности не установлен. Ко второму классу относятся 10 веществ, найденных в ОГ дизеля; окислы азота,  $SO_3$  (аэрозоль  $H_2SO_4$ ), бензол, фенантрен, фенол,  $\beta$ -нафтол, формальдегид, акролеин, муравьиная кислота, фуран. К третьему классу опасности принадлежит 33 вещества, к четвертому — 40.

При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны или атмосферном воздухе нескольких вредных веществ одностороннего действия\* сумма отношений фактических концентраций каждого из них ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) в воздухе к их ПДК (ПДК<sub>1</sub>, ПДК<sub>2</sub> ... ПДК<sub>n</sub>) не должна превышать единицы, т.е.

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1. \quad (1)$$

При одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ, не обладающих односторонним действием, ПДК остаются такими же, как и при изолированном воздействии. Недостаточная изученность токсичности компонентов ОГ дизелей не позволяет обоснованно подойти к решению проблемы комплексной количественной оценки токсичности ОГ как сложной смеси веществ.

Вместе с тем можно обозначить следующие задачи, решение которых требует обоснования количественного критерия\*\* токсичности ОГ ДВС:

- экологическая оценка эффективности регулировок двигателя, изменяющих соотношение концентраций токсичных компонентов в ОГ;
- оценка эффективности различных способов очистки ОГ;
- расчет экономического эффекта от снижения токсичности ОГ с помощью тех или иных способов;
- расчет токсичности автомобиля;
- сравнительная оценка токсичности двигателей разных типов;
- оценка загрязнения атмосферы выбросами двигателей и т.п.

Существуют два альтернативных подхода к выбору количественного критерия токсичности ОГ на основе измеренных концентраций: суммарная оценка и оценка по наихудшему показателю. Для обоснования выбора, наиболее пригодного в том или ином случае, обратимся в соответствии с нормативными документами к формуле (1) (отношение  $C_i/\text{ПДК}_i$  называют *относительной концентрацией*). Это выражение дает условие безвредности смеси веществ одностороннего действия. Сумму относительных концентраций веществ в этом случае следует использовать для расчета минимального количества свежего воздуха, необходимого для разбавления смеси до безвредного состояния: например, если сумма равна 3, смесь нужно разбавить минимум втрое, т.е. добавить к ее объему 2 объема свежего воздуха; эту же сумму следует принять и за критерий токсичности смеси.

\* Одностороннее — действие на одни и те же системы организма.

\*\* Под количественным критерием токсичности будем понимать величину, показывающую, насколько токсична смесь определенного состава, т.е. во сколько раз ее токсичность выше или ниже установленного предела и во сколько раз она токсичнее смеси другого состава.

Этот критерий в соответствии с данным выше определением является количественным, поскольку он позволяет вычислить, во сколько раз смесь веществ токсичнее предельно допустимого значения, т.е. единицы, и поэтому показывает, во сколько раз смесь веществ одного состава токсичнее смеси веществ другого состава.

При отсутствии однонаправленного действия условие безвредности смеси веществ заключается в том, чтобы не сумма относительных концентраций, а относительная концентрация каждого вещества отдельно не превышала единицы, т.е.  $C_i/\text{ПДК}_i \leq 1$ . В этом случае минимальное количество свежего воздуха, потребного для разбавления смеси до безвредного по санитарным нормам состояния, следует рассчитывать по наибольшему значению относительной концентрации ее компонентов. При наличии преобладающей относительной концентрации одного вещества в смеси это количество будет с избытком достаточно для разбавления других веществ; для смесей воздуха с одним или несколькими веществами с разными относительными концентрациями это количество будет одинаковым, хотя токсичность этих смесей явна различна.

Наибольшее значение относительной концентрации компонента смеси можно принять и за критерий ее токсичности, который позволяет количественно оценить токсичность одного компонента, но не является количественным критерием токсичности смеси, т.е. не учитывает вклад других компонентов.

Сумма относительных концентраций веществ при отсутствии их однонаправленного действия также не может служить количественным критерием токсичности, так как ее значение не показывает, во сколько раз она превышает допустимый предел (поскольку этого предела не существует), т.е. во сколько раз нужно разбавить смесь свежим воздухом, чтобы довести ее до безвредного состояния. Иногда за допустимый предел суммы относительных концентраций принимают число компонентов смеси. Однако условие

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq n \quad (2)$$

является необходимым, но недостаточным условием безвредности; кроме выполнения этого условия, как уже было сказано, относительная концентрация каждого компонента отдельно не должна превышать единицы.

Сравнение суммы относительных концентраций компонентов с их числом может привести к выводу о безвредности смеси, когда по одному из компонентов она токсична сверх нормы. Аналогичная ситуация возможна и при вычислении количества свежего воздуха, необходимого для разбавления смеси до безвредного состояния: разбавление во столько раз, во сколько сумма относительных концентраций превышает число компонентов, может быть недостаточным с точки зрения наихудшего показателя.

Существует и другая трактовка суммы относительных концентраций веществ в качестве количественного критерия токсичности газовых смесей. Так, предложен [2] показатель токсичности газовой смеси:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} - 1. \quad (3)$$

Показатель  $\mu$  является количественным критерием токсичности газовой смеси только в том случае, когда компоненты действуют на организм однонаправленно. При отсутствии такого действия условие безвредности  $\mu \leq 0$  вместо условия  $C_i/\text{ПДК}_i \leq 1$  будет неоправданно жестким. Расчет количества воздуха, необходимого для разбавления смеси до безвредного состояния, дает значение, завышенное по сравнению с расчетом по наихудшему показателю. В связи с этим интересно проследить, как изменяется качественная характеристика токсичности компонентов от одного химического класса к другому и внутри классов.

Из 10 классов органических соединений только два обладают специфическим действием на одну и ту же систему организма: сильное раздражающее действие — главная токсическая характеристика органических кислот и кетонов.

В других случаях действие представителей одного класса резко различно. Так, канцерогенной активностью из всех углеводородов обладают только некоторые четырех-пятиядерные ароматические углеводороды, и это свойство является, конечно, основной их токсической характеристикой, но оно ничего общего не имеет с действием других многоядерных ароматических углеводородов (нафталин, индан, инден, флуорен и др.).

Многие вещества обладают сложным действием. Сильное раздражающее действие кислотообразующих неорганических газов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), альдегидов, спиртов, кетонов, гетероциклов и многих углеводородов (кроме алканов) нельзя считать основной их токсической характеристикой, так как оно сопровождается действием на другие системы организма. Так, метиловый, *N*-амиловый, аллиловый спирты отличаются от других спиртов сильным общетоксическим действием (то же относится к формальдегиду и акролеину по сравнению с другими альдегидами). В качестве второго примера можно назвать кровяные яды:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$  и бензол, которые одновременно действуют и на другие системы организма. Кроме того, и на кровь они действуют по-разному. Все это показывает, что вопрос о том, действие каких веществ следует считать однонаправленным, сложен и должен решаться токсикологами.

По сведениям о комбинированном действии ядов [3 и 4], применительно к воздуху рабочей зоны однонаправленное действие на организм человека оказывают следующие группы веществ из ОГ дизелей:  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  — нарушают дыхание тканей (первая группа); оксиды азота, оксиды серы, альдегиды — оказывают раздражающее действие (вторая группа); углеводороды — оказывают наркотическое и паренхиматозное действие (третья группа).

Кроме того, было обнаружено усиление действия CO и оксидов азота при совместном присутствии как в острых опытах при смертельных концентрациях, так и в хронических опытах при низких концентрациях (ниже ПДК рабочей зоны). Токсичность NO<sub>x</sub> в присутствии CO возрастает в 3, а токсичность CO в смеси с NO<sub>x</sub> — в 1,5 раза. Для этого случая вместо формулы (1) предложено выражение:

$$\frac{C_{CO}}{ПДК_{CO} : 1,5} + \frac{C_{NO_x}}{ПДК_{NO_x} : 3} \leq 1, \quad (4)$$

которое не вносит каких-либо дополнительных трудностей в вопрос об оценке токсичности суммы веществ.

Таким образом, ОГ дизелей включают в себя смесь вредных веществ, часть которых действует на организм одновременно, а два вещества обладают сложным действием.

Основные нормируемые в ОГ дизелей компоненты: CO, NO<sub>x</sub> и углеводороды вместе взятые не обладают однонаправленным действием.

Условие безвредности ОГ дизелей (а также и любых других продуктов горения нефтяного топлива) заключается в том, чтобы суммы относительных концентраций веществ однонаправленного действия, сумма относительных концентраций CO и NO<sub>x</sub> в соответствии с выражением (4) и относительные концентрации других веществ не превышали единицы.

Рассмотрим способ расчета количества свежего воздуха, необходимого для разбавления ОГ дизелей до безвредного состояния.

Авторы работы [57] для расчета индекса качества воздуха (AQI) в шахте, где работают дизели, используют формулу широко известную в США:

$$AQI = \frac{C_{CO}}{\tau_{zv} CO} + \frac{C_{NO}}{\tau_{zv} NO} + \frac{C_{RCD}}{\tau_{zv} RCD} + 1,5 \left[ \frac{C_{SO_2}}{\tau_{zv} SO_2} + \frac{C_{RCD}}{\tau_{zv} RCD} \right] + 1,2 \times \left[ \frac{C_{NO_2}}{\tau_{zv} NO_2} + \frac{C_{RCD}}{\tau_{zv} RCD} \right], \quad (5)$$

где  $\tau_{zv}$  — пороговое предельное значение  $i$ -го компонента ОГ; RCD — вдыхаемая горячая пыль.

Аналогичное выражение используется и для оценки токсичности ОГ дизеля. Авторы считают, что величина AQI не должна превышать 8,4, но для обеспечения безвредной атмосферы в шахте рекомендуют более жесткое условие:  $AQI \leq 3$ .

На основании вышеизложенного можно утверждать, что минимальное количество свежего воздуха, необходимое для разбавления до безвредного состояния ОГ дизелей или воздуха в шахте, где они работают, следует рассчитывать по наихудшему показателю, т.е. по относительным концентрациям NO<sub>x</sub> и CO с учетом потенцирования по формуле (4).

При низких концентрациях CO это количество будет практически равно рассчитанному по относительной концентрации NO<sub>x</sub>.

Суммирование относительных концентраций компонентов ОГ лежит в основе суммирования их "нормообъемов" [5] и лишает последнюю операцию количественного характера. Нормообъем компонента ОГ равен произведению его относительной концентрации на объем ОГ, выбрасываемый двигателем в единицу времени (м<sup>3</sup>/ч):

$$Q_i = \frac{C_i}{ПДК_i} Q_{OG} \quad (6)$$

Суммарный нормообъем для газовой среды, содержащей несколько компонентов

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} Q_{OG} \quad (7)$$

При работе двигателя на одном режиме  $Q_{OG} = \text{const}$  может быть вынесен за знак суммы, т.е.

$$Q_{\Sigma} = Q_{OG} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i}, \quad (8)$$

откуда видно, что в основе суммирования нормообъемов лежит суммирование относительных концентраций.

### 2.3. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ И ИХ ТОКСИЧНОСТЬ

**Общие сведения.** Снижение токсичности и дымности ОГ, вызывающих загрязнение атмосферы вредными веществами, является одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством. Вредные выбросы ОГ дизелей отрицательно воздействуют на здоровье людей и животных, вызывают повреждения растений, повышенную коррозию металлов и преждевременное разрушение строительных материалов, ухудшают видимость для водителей всех видов транспорта.

Наиболее опасны для человека, животного и растительного мира оксиды азота, сажа, альдегиды, окись углерода, углеводороды, бенз(а)пирен, оксиды серы, аммиак, двуокись углерода, а также запах и слезоточивое действие ОГ.

Рядом исследований [7, 8, 9 и 58] доказано, что продукты сгорания топлива могут накапливаться в воде, растениях, на сооружениях и в почве. В воздухе они могут превращаться в другие вещества, которые в определенных условиях могут быть более токсичными, чем исходные продукты [59].

Серьезную проблему представляет повышение локальных концентраций токсичных веществ ОГ в зонах работы сельскохозяйственных машин. Это в полной мере относится к составу воздуха как в кабинах

тракторов, самоходных шасси, комбайнов, так и животноводческих комплексов, парников, хранилищ и других мест с ограниченным воздухообменом.

Установленные на отечественных тракторах вентиляторы не обеспечивают в жаркое время года необходимого улучшения условий труда. Наличие токсичных компонентов ОГ в кабинах тракторов приводит к кислородному голоданию организма и особенно вредно воздействует на центральную нервную систему обслуживающего персонала [10].

Загрязнение атмосферы кабин зерноуборочных комбайнов токсичными компонентами ОГ приводит к отклонению условий труда комбайнеров, в результате чего производительность их труда может упасть до 10...40%.

Оксиды азота. Известно около 10 различных по составу оксидов азота. В ОГ дизеля 95...98% приходится на NO, а 2...5% — на NO<sub>2</sub>. Содержание других оксидов азота в ОГ ничтожно. В атмосфере при нормальных условиях NO (бесцветный газ, очень плохо растворяется в воде) окисляется до NO<sub>2</sub> (газ красновато-бурого цвета с характерным запахом, тяжелее воздуха, слабо растворимый в воде, плотность по воздуху 1,58) и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Оксиды азота, взаимодействуя с парами воды в воздухе, образуют азотную кислоту, которая разрушает легочную ткань, вызывая хронические заболевания. По мере увеличения загрязнения воздуха оксидами азота усиливается их влияние на организм человека: концентрация NO<sub>x</sub> в воздухе 10<sup>-5</sup>% — абсолютный порог воздействия; 0,0001...0,0003% — порог восприятия запаха; 0,0013% — порог раздражения слизистых оболочек носа и глаз; 0,001...0,002% — образование метгемоглобина; 0,004...0,008% — отек легких.

Оксиды азота, в первую очередь NO<sub>2</sub>, вызывают необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе, оказывают патологическое состояние беспокойства. В соединении с углеводородами они образуют токсичные нитроолефины. Воздействие NO<sub>x</sub> на организм человека нельзя ослабить никакими нейтрализующими средствами. При хроническом отравлении наблюдаются воспалительные заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, реже мышечная и сердечная слабость, нервные расстройства.

Поглощая естественную фоновую радиацию в ультрафиолетовой и видимой частях спектра NO<sub>x</sub> снижают прозрачность атмосферы и участвуют в образовании фотохимического тумана — смога, состоящего из фотохимических оксидантов и озона [11].

Ни NO, ни NO<sub>2</sub> непосредственно на металлы не воздействуют. Но NO<sub>2</sub> реагирует с атмосферной влагой и образует азотную кислоту, которая вызывает коррозию металла.

Оксид углерода. CO — бесцветный газ без запаха и без вкуса; очень плохо растворим в воде; плотность по воздуху 0,97; горюч; с воздухом

образует взрывчатые смеси; с металлами, щелочами и водой не реагирует.

Механизм токсического действия CO на организм очень сложен. Он вытесняет кислород из оксигемоглобина крови, образуя карбоксигемоглобин. Это приводит к падению способности крови переносить достаточно кислорода из легких к тканям. Из-за пониженного содержания O<sub>2</sub> в крови наступает удушье. Основные симптомы отравления: потеря сознания, судороги, одышка, удушье. Если концентрация CO мала, то сразу появляются известные субъективные ощущения, которые могут служить предостережением об опасности: голова становится тяжелой, появляется ощущение сдавливания лба обручами, сильная боль во лбу, висках, в глазах — "туман", в висках — ощущение пульсации. В дальнейшем наступает головокружение, шум в ушах, дрожь, чувство слабости, рвота, учащается пульс. При дальнейшем отравлении притупляется сознание, развивается состояние слабости и безучастности, равнодушия, затем нарастает сонливость, оцепенение и теряется сознание.

В условиях производственного контакта для хронического влияния CO характерно разнообразие симптомов. Типичны жалобы на головную боль, быструю утомляемость, головокружение, сонливость, раздражительность, боли в области сердца, неустойчивость эмоциональной сферы.

Воздействие CO на организм человека зависит от ее концентрации в воздухе: при концентрации 0,0016% вредного воздействия нет; 0,01% — при длительном пребывании работающих наступает хроническое отравление; 0,05% — слабое отравление через 1 ч; 1% — потеря сознания через несколько вдохов.

Особое внимание надо обращать на наиболее распространенный тип хронического отравления небольшими дозами CO при концентрации, близкой к 0,01%. Такого рода отравления характерны у водителей и работающих в условиях с ограниченным воздухообменом.

Углеводороды. Это самая многочисленная группа соединений, являющихся представителями следующих гомологических рядов: алканов, алкенов, алкадиенов, цикланов, полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в т.ч. канцерогенного бенз(а)пирена. Углеводороды парафинового и олефинового рядов вызывают неприятный запах и раздражающее действие ОГ, а также многочисленные хронические заболевания. Ряд ароматических углеводородов обладает сильными отравляющими средствами, воздействует на процессы кроветворения, центральную нервную и мышечную системы. Углеводороды алифатического типа менее вредны, но могут оказывать наркотическое действие.

По данным Ю.Г. Фельдмана, гексан даже при концентрациях 60 мг/м<sup>3</sup> не оказывает заметного воздействия на организм. Также мало токсичны бутан и пентан.

Алкены, этилен, пропилен, бутан обладают неприятным запахом и оказывают раздражающее действие на слизистые оболочки. Действие некоторых алкенов на организм подопытных животных приводит к сниже-

нию активности ферментов, вызывает изменение функционального состояния центральной нервной системы, понижает давление.

В состав "смога" входят фотооксиданты, в т. ч.  $\text{NO}_x$ , пероксиацетилнитраты, озон, органические перекиси, свободные радикалы и т.д. Эти вещества обладают сильными окислительными свойствами, оказывают общетоксическое и раздражающее действие, снижают видимость и вызывают повреждение растительного покрова.

**Бенз(а)пирен и другие (ПАУ).** Бенз(а)пирен в нормальных условиях — это кристаллическое вещество; температура плавления  $179^\circ\text{C}$ , кипения — около  $310^\circ\text{C}$ , возгоняется при  $70^\circ\text{C}$ . Молекулярный вес 252,3; молекула состоит из пяти колец; плохо растворим в воде.

Проблема предотвращения загрязнения окружающей среды канцерогенными ПАУ выходит за рамки крупных промышленных городов. Повышенное содержание БП наблюдается повсеместно, причем отмечено сезонное колебание концентрации БП в почве сельскохозяйственных полей. Так, при изучении динамики изменения содержания БП на контрольных полях Павлодарской и Ферганской областей содержание БП в почве на глубине до 10 см в течение летнего периода увеличилось на 2,2...3,5 мкг/кг (исследования Когана Ю.Л.). Опасность подобного загрязнения заключается в возможности перехода БП в возделываемые культуры, а затем в организм человека.

**Формальдегид.** Этот газ не имеет цвета, но обладает резким запахом. Его химическая формула  $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$  плотность по воздуху 1,04, он легко растворяется в воде. Воздействие на организм человека при концентрации:  $0,37 \cdot 10^{-3}\%$  — безвреден;  $0,7 \cdot 10^{-2}\%$  — легкое раздражение дыхательных путей и слизистых оболочек носа и глаз;  $10^{-2}\%$  — осложнения. Действие формальдегида на организм человека характеризуется раздражающим и общетоксичным эффектом на центральную нервную систему, поражает внутренние органы, инактивирует некоторые ферменты [12].

**Акролеин.** Эта жидкость без цвета, с запахом пригорелых жиров; плотность паров по воздуху 1,9; летуча; температура кипения  $52,4^\circ\text{C}$ ; легко растворяется в воде. Воздействие на организм человека при концентрации:  $0,8 \cdot 10^{-4}\%$  — безвреден;  $0,16 \cdot 10^{-3}\%$  — порог восприятия запаха;  $0,5 \cdot 10^{-3}\%$  — трудно переносим;  $0,2 \cdot 10^{-2}\%$  — непереносим;  $0,14 \cdot 10^{-1}$  — смертельная доза.

**Сажа.** Свойства сажи обусловлены не углеродом, а присутствием канцерогенных ПАУ [14,61]. Наличие сажи в ОГ приводит к появлению неприятного ощущения загрязненности воздуха и ухудшает видимость. При вдыхании сажи ее частицы оказывают вредное воздействие на дыхательные органы человека. Относительно крупные частицы сажи размером от 2 до 10 мкм из организма выводятся легко, а мелкие размером от 0,5 до 2,0 мкм в легких задерживаются и вызывают аллергию дыхательных путей.

**Сернистый ангидрид.** Это газ без цвета с острым запахом; плотность

по воздуху 2,264; хорошо растворяется в воде, образуя сернистую кислоту. По этой причине при вдыхании воздуха с  $\text{SO}_2$  наблюдается раздражающее действие на верхние дыхательные пути. Другие стороны воздействия  $\text{SO}_2$  на организм человека: нарушается белковый обмен и ферментативные процессы, наблюдаются раздражение глаз и кашель. Влияние на организм человека проявляется при следующих концентрациях: 0,0017% — раздражение глаз, кашель; 0,0007...0,001% — раздражение в горле; 0,004% — отравление через 3 мин; 0,01% — отравление через 1 мин.

**Воздействие на сельскохозяйственные культуры и растения.** Наиболее чувствительны к загрязнению атмосферы свекла, злаки, бобы, салатные культуры, виноград и др. В частности, допустимая средняя концентрация  $\text{NO}_x$ , не приводящая к поражению листьев этих растений в течение 0,5 ч, —  $0,8 \text{ мг/м}^3$  [1]. Кроме того, наличие  $\text{NO}_2$  в атмосфере приводит к протеканию фотохимических реакций и образованию в качестве вторичных продуктов озона ( $\text{O}_3$ ) и пероксиацетилнитрата, вредное действие которых на листья растений проявляется при более низких концентрациях  $\text{NO}_2$ , чем исходная.

Концентрация  $\text{NO}_2$  в воздухе в 4...6 мкг/м<sup>3</sup> приводит к серьезному повреждению растений, при концентрации до 2 мг/м<sup>3</sup> и длительном воздействии происходит хлороз растений. Низкие концентрации  $\text{NO}_2$  в воздухе вызывают снижение роста.

Растения очень чувствительны к загрязнению воздуха двуокисью серы, разрушающей хлорофилл. Лиственные растения, ежегодно сбрасывающие листву, легче переносят загрязнение атмосферы двуокисью серы, а хвойные — более болезненно реагируют на  $\text{SO}_2$ . При концентрации  $\text{SO}_2$  в воздухе 0,015...0,035 мг/м<sup>3</sup> прирост древесной массы хвойных деревьев составляет примерно 20% из-за снижения интенсивности фотосинтеза без изменения интенсивности дыхания хвои. При концентрации  $\text{SO}_2$  от 0,23 до 0,32 мг/м<sup>3</sup> нарушение фотосинтеза и дыхания хвои вызывает усыхание сосны за 2...3 года. Концентрация  $\text{SO}_2$  в летнее время 0,08...0,1 мг/м<sup>3</sup> и в зимнее время 0,2 мг/м<sup>3</sup> приводит к постепенной гибели большинства растений.

Загрязнение атмосферы ОГ приводит к накоплению в сельскохозяйственных культурах канцерогенного БП. Наибольшее его количество найдено в пробах кочанной капусты (15,6...24,5 мкг/кг), наименьшее — в пробах помидоров (0,22 мкг/кг). В хлебном зерне БП содержится в количестве от 0,68 до 1,44 мкг/кг [9].

Несмотря на отсутствие достаточно точных количественных данных, характеризующих наносимый ущерб от загрязнения атмосферы, приведенные выше данные убедительно свидетельствуют о необходимости принятия неотложных мер по уменьшению вредного воздействия ОГ дизелей.

### 3. НОРМИРОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ

#### 3.1. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ

**Общие сведения.** Автотракторный транспорт наряду с промышленностью — один из основных источников загрязнения атмосферы. Данные по выбросам в атмосферу некоторых веществ естественного и промышленного происхождения представлены в таблице 4.

#### 4. Соотношения между естественным и промышленным выделением вредных веществ в атмосферу Земли

| Компонент         | Природные выделения, т/год    | Индустриальные выбросы, т/год |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Оксид углерода    | —                             | $2 \cdot 10^8$                |
| Соединение азота  | $1,4 \cdot 10^9$              | $6,5 \cdot 10^7$              |
| Пыль              | $(0,77 \dots 1,2) \cdot 10^9$ | $(0,1 \dots 0,2) \cdot 10^9$  |
| Сернистый газ     | $1,42 \cdot 10^8$             | $1,03 \cdot 10^8$             |
| Двуокись углерода | $7 \cdot 10^{10}$             | $1,5 \cdot 10^{10}$           |

Несмотря на то что естественное природное выделение ряда токсичных компонентов превышает промышленное, последнее в жизнедеятельности человека играет более заметную роль из-за локального загрязнения атмосферы в населенных пунктах и в районах выращивания сельхозпродукции растительного и животного происхождения. В высокоразвитых странах с высоким уровнем автомобилизации доля автотракторной техники в выбросе вредных веществ весьма высока (табл. 5).

#### 5. Доля источников вредных выбросов в загрязнении атмосферы

| Источники загрязнения                       | Доля в загрязнении атмосферы (%) в странах |        |                        |
|---|--|--------|------------------------|
|   | США  | Англия | Франция (по г. Парижу) |
| Автомобильный транспорт                     | 60,6                                       | 33,5   | 32                     |
| Промышленность и энергетические предприятия | 30,3                                       | 35,0   | 28                     |
| Отопительные и прочие системы               | 9,1  | 30,5   | 40                     |

В СССР, Польше и ряде других стран доля автотракторного транспорта в загрязнении атмосферы составляет до 30%. Значительное увеличение производства автотракторной техники и идущая во всем мире дизелизация постепенно увеличивают долю автотракторных дизелей в общем балансе загрязнения атмосферного воздуха. При оценке последствий загрязнения атмосферы на территории различных районов следует

учитывать степень промышленного развития, количество автотракторной техники, географические и климатические условия этих районов, а также вопросы организации движения транспортных средств и время суток.

Стандарты на качество воздуха позволяют сконцентрировать усилия по оздоровлению атмосферного воздуха в тех районах, в которых загрязнение его превышает допустимый предел.

В СССР нормы для атмосферного воздуха установлены ниже защитно-приспособительных реакций. В этом заключается отличие в подходе к нормированию в СССР и странах Восточной Европы по отношению к другим странам, в которых под критерием вредности загрязнения атмосферы понимается заболеваемость человека.

**Предельно допустимые концентрации.** Нормативом качества воздуха в СССР является предельно допустимая концентрация (ПДК) индивидуальных веществ.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>р.з.</sub>) — концентрация, которая при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч (или при другой продолжительности, но не более 41 ч в неделю) за весь рабочий стаж не может вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Рабочая зона — пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих.

Что касается максимально разовой ПДК вредных веществ в атмосфере (ПДК<sub>м.р.</sub>) и среднесуточной (ПДК<sub>с.с.</sub>), то пока в СССР нет утвержденного определения этих величин. Допустимой для атмосферы может быть признана только такая концентрация, которая не оказывает на человека прямого или косвенного вредного и неприятного действия, не снижает его работоспособности, не влияет на самочувствие или настроение. Время осреднения для ПДК<sub>м.р.</sub> — 20...30 мин, для ПДК<sub>с.с.</sub> — 24 ч.

В СССР утверждены атмосферные предельно допустимые концентрации на 140 вредных веществ. В таблице 6 представлены значения ПДК токсичных компонентов в воздухе населенных пунктов и рабочей зоны согласно нормам, утвержденным Главным санитарно-эпидемиологическим управлением Министерства здравоохранения СССР и Госстроем СССР (СН 245-71 и последующие дополнения), типичных для ОГ двигателей внутреннего сгорания.

Концентрация каждого токсичного компонента, в том числе на рабочем месте механизатора, не должна превышать значений, указанных в таблице 6.

Загазованность и запыленность воздуха на рабочих местах — одно из наиболее распространенных видов вредности как при производстве полевых механизированных работ, так и при выполнении работ в стацио-

6. Нормы предельно допустимой концентрации токсичных веществ, мг/м<sup>3</sup>

| Зона                                   | Оксиды азота    |                 |    | Са-жа | СО | БП      | СН <sub>х</sub> | Альдегиды |                |
|--|-----------------|-----------------|----|-------|----|---------|-----------------|-----------|----------------|
|  | NO <sub>x</sub> | NO <sub>2</sub> | NO |       |    |         |                 | акро-лейн | форм-альде-гид |
| На рабочем месте (ПДК <sub>р.з</sub> ) | 5               | 9               | 30 | 3,5   | 20 | 0,00015 | 30              | 0,70      | 0,5            |
| В атмосфере населенных мест:           |                 |                 |    |       |    |         |                 |           |                |
| среднесуточная (ПДК <sub>с.с</sub> )   | -               | 0,085           | -  | 0,05  | 1  | 0,001   | -               | 0,03      | 0,012          |
| максимальная (ПДК <sub>м.р</sub> )     | -               | 0,085           | -  | 0,15  | 3  | -       | -               | 0,03      | 0,035          |

нарных условиях (в комбикормовых цехах и животноводческих фермах, складах, теплицах и на других производственных участках).

Минздравом СССР установлено дополнительное требование об обязательном суммировании воздействия оксидов серы и азота, которое выражается условием:

$$\frac{C_{SO_2}}{ПДК_{SO_2}} + \frac{C_{NO_2}}{ПДК_{NO_2}} \leq 1, \quad (9)$$

что ужесточает требования, предъявляемые к двигателям внутреннего сгорания с точки зрения охраны атмосферного воздуха от загрязнений.

**Нормы по токсичности ОГ.** Принятые в различных странах, они отличаются по типу машин, на которые распространяются, по условиям, для которых устанавливается предельный выброс токсичных веществ, а также по допустимой величине этих выбросов.

В большинстве стран нормы разработаны для транспортных средств (например, легковые автомобили, автобусы, грузовые автомобили различной грузоподъемности и т.д.) независимо от типа устанавливаемого на них двигателя (карбюраторный двигатель, дизель и т.д.).

Методы контроля отличаются главным образом программами испытаний, имитирующих характерные для каждой страны условия эксплуатации автотранспорта, а также методиками отбора проб, гарантирующими точность анализа ОГ. Наиболее распространены следующие методы контроля: 1) метод CVS - С/Н (США); 2) метод 10/11 (Япония); 3) метод ЕЭК ООН (страны ЕЭС и СЭВ).

Динамика изменения норм по Федеральному (FTP) и Калифорнийскому стандартам США дана в таблице 7.

Для сравнения в таблице 8 приведены нормы 1985 г. на содержание вредных веществ в ОГ двигателей транспортных средств, действующие в различных странах.

7. Динамика изменения норм выбросов по Федеральному и Калифорнийскому стандартам США (метод CVS-C/H)

| Год  | Предельная норма выбросов, г/км |                 |                 |                         |                 |                      |
|------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
|      | Федеральный стандарт (FTP)      |                 |                 | Калифорнийский стандарт |                 |                      |
|      | СО                              | СН <sub>х</sub> | NO <sub>x</sub> | СО                      | СН <sub>х</sub> | NO <sub>x</sub>      |
| 1968 | 32                              | 3,7             | 3,1             | 50                      | 50              | Не регламентируется. |
| 1973 | 17                              | 1,9             | 1,9             | 17                      | 1,9             | 1,9                  |
| 1975 | 9,3                             | 0,9             | 1,9             | 5,6                     | 0,58            | 1,2                  |
| 1982 | 2,1                             | 0,255           | 0,6             | 5,1                     | 0,28            | 0,25 (0,62) **       |
| 1983 | 2,1                             | 0,255           | 0,6             | 5,1                     | 0,28            | 0,25 (0,62)          |
| 1984 | 2,1                             | 0,255           | 0,6             | 5,1                     | 0,28            | 0,25 (0,62)          |
| 1985 | 2,1                             | 0,255           | 0,6             | 5,1                     | 0,28            | 0,25 (0,62)          |

\* Надежность норм гарантируется при пробеге не более 80 000 км.

\*\* Надежность норм гарантируется при пробеге не более 100 000 км.

8. Нормы выбросов вредных веществ с ОГ на 1985 г.

| Страна   | Метод контроля | Содержание вредных веществ, г/км |                 |                 |
|--|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
|  |                | СО                               | СН <sub>х</sub> | NO <sub>x</sub> |
| США  | 75 ГТР         | 2,1                              | 0,255           | 0,62            |
| Япония   | 10/11          | 2,12                             | 0,26            | 0,25            |
| Австралия                                      | 75 ГТР         | 9,3                              | 0,93            | 1,9             |
| Канада   | 75 ГТР         | 15,5                             | 1,2             | 1,9             |
| Швеция   | 72 ГТР         | 24                               | 2,1             | 1,9             |
| Швейцария                                      | 72 ГТР         | 9,3                              | 0,93            | 1,2             |
| Страны ЕЭС (в зависимости от массы автомобиля) | ЕСЕ-15         | 20...43                          | 3,3...5,1       | 1,7...2,3       |
| ФРГ  | Правила XXIII  | 2,1                              | 0,25            | 0,62            |

Из-за различия методов контроля их прямое сравнение результатов испытаний затруднено. Ниже представлены ориентировочные зависимости перерасчета результатов испытаний транспортных средств по методикам ЕЭК ООН и CVS - С/Н [61]:  $CO_{CVS-C/H} (г/км) = 2,06 + 0,26 \cdot EЭК ООН$ ;  $СН_{х CVS-C/H} (г/км) = 0,15 + 0,52 \cdot EЭК ООН$ ;  $NO_{х CVS-C/H} (г/км) = 0,71 + 0,12 \cdot EЭК ООН$ .

Для определения токсичности ОГ дизелей в США, Японии, СССР, ГДР и в других промышленно развитых странах разработаны специальные испытательные циклы. В США, ГДР, европейских странах, входящих в ЕЭК ООН (в том числе и СССР, принимающего участие в работе Комитета по внутреннему транспорту ЕЭК ООН по вопросам загрязнения воз-

духа автотранспортом), сформирован единый испытательный цикл для дизелей, впервые введенный в США.

Испытательный шестирежимный японский цикл распространения в остальных странах не нашел.

Федеральный стандарт США на дымность и выброс вредных веществ от новых дизелей, предназначенных для тяжелых транспортных средств, введен в 1973 г.

Испытания дизелей на выброс с ОГ газообразных токсичных компонентов (CO, CH<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub>) ведутся в течение 125 ч по 13-ступенчатому циклу, разработанному в США (табл. 9) и включающему в себя три режима холостого хода с минимальной частотой вращения коленчатого вала двигателя, пять режимов при номинальной частоте вращения и пять режимов с частотой вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту.

Время работы на каждом режиме составляет 10 мин. Расчет выброса CO, CH<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub> ведется в следующем порядке:

сначала определяют средние значения концентраций перечисленных токсичных веществ за последнюю минуту испытаний на каждом режиме с учетом влажности воздуха;

по найденным значениям концентраций рассчитывают часовые весовые выбросы вредных компонентов, одновременно определяют эффек-

9. Испытательный 13-ступенчатый цикл для дизелей

| Но-<br>мер<br>сту-<br>пени | Режим работы дизеля               |                          | Продолжительность режима, мин   |                                     |   |                | Кoeffи-<br>циент при-<br>ведения<br>(K) |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|----------------|---|
|                            | Частота вращения коленчатого вала | Нагруз-<br>ка<br>(± 2 %) | Время на сме-<br>ну режи-<br>ма | Время на орга-<br>низацию<br>режима | Время на кон-<br>троль<br>состава<br>ОГ | Общее<br>время |   |
| 1                          | n <sub>х</sub> .x min             | 0                        | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | —                                       |
| 2                          | Для ступеней                      | 2                        | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 3                          | 2..6 соответствую-                | 25                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 4                          | щая максималь-                    | 50                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 5                          | ному крутя-                       | 75                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 6                          | щему моменту*                     | 100                      | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 7                          | n <sub>х</sub> .x min             | 0                        | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,20                                    |
| 8                          | Для ступеней                      | 100                      | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 9                          | 8..12 соот-                       | 75                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 10                         | ветствующая                       | 50                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 11                         | номинальной                       | 25                       | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 12                         | мощности                          | 2                        | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | 0,08                                    |
| 13                         | n <sub>х</sub> .x min             | 0                        | 1                               | 8                                   | 1                                       | 10             | —                                       |

\* Частота вращения коленчатого вала на режимах по пп. 2..6 выбирается в диапазоне 60..75% от n<sub>ном</sub>.

тивную мощность на режимах испытаний (данный расчет ведут с учетом коэффициентов приведения, отображающих условно долю каждого режима в условиях реальной работы транспортного средства);

полученные значения вредных выбросов (M<sub>CO</sub>, CH<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) суммируют за весь цикл по каждому компоненту отдельно и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл рассчитывают удельные выбросы вредных веществ по следующей формуле:

$$g_{CO, CH_x, NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (M_{CO, CH_x, NO_x} K)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} K)} \quad (10)$$

Средние значения удельных выбросов вредных веществ за два цикла испытаний сравнивают с предельно допустимыми нормами (табл. 10).

Вариантом является оценка токсичности ОГ дизелей по стандарту ГДР TGL 25324/01/02, согласно которому для каждого из трех скоростных режимов ведут испытания двигателя по шести нагрузочным режимам, а также при работе на холостом ходу. Подсчет удельных выбросов сажи, CO и NO<sub>x</sub> проводится также с учетом коэффициентов приведения, зависящих от отношения мощности дизеля к условной массе транспортного средства (всего четыре категории).

При проведении испытаний по стандарту ГДР TGL 25324/01/02 дизель должен быть укомплектован вентилятором, ненагруженным генератором и компрессором. Допустимая ошибка в измерении расхода топлива не должна превышать 1 %.

Кoeffициенты приведения стандартов США, ГДР, ЕЭК ООН и других стран заданы на основании анализа статистических данных, полученных в результате исследования распределения режимов работы большого количества автомобилей с дизельным приводом в условиях городского движения.

Наиболее жесткие требования в США будут предъявлены к дизелям, устанавливаемым на автобусы с 1991 г., а для большинства дизелей — начиная с 1994 г. Для удовлетворения этих требований предполагаются большие изменения в конструкции двигателя, применение каталитических нейтрализаторов или фильтров при одновременном использовании систем автоматической электронно-управляемой топливоподачи и, возможно, использование метанола и сжатого газа в качестве топлива.

Анализ опыта США показывает, что стандарты устанавливающие нормы вредных выбросов, методы испытаний и анализа токсичных компонентов, требования к испытательному оборудованию и газоаналитическим приборам, играют важную роль в улучшении показателей транспортных средств с ДВС по показателям токсичности и дымности ОГ.



## 10. Нормы на выбросы вредных веществ и дымности ОГ дизелей в ведущих капиталистических странах

| Нормируемый параметр | Значение норм (по годам) в                     |   |                                     |                              |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     | странах ЕЭК ООН (г/кВт·ч) с 1982  |   |         |                              |
|----------------------|--|---|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---------|------------------------------|
|                      | США (г/кВт·ч)                                  |   |                                     |                              |                                     | Япония* ( $\% \cdot 10^{-6}$ )      |                                     |                                     |                                     |                                     |   |   |         |                              |
|                      | с 1978   | с 1986  | с 1988                              | с 1991 (проект)              | с 1994 (проект)                     | с 1979                              | с 1982                              | с 1994 (проект)                     | с 1994 (проект)                     | с 1982                              |   |   |         |                              |
| Дымность ОГ          | дизели грузовых автомобилей массой более 2,5 т | дизели грузовых автомобилей массой более 3,8 т                          | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели городских автотобусов | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели тяжелых грузовых автомобилей | дизели автомобилей большой грузоподъемности и строительных машин (массой более 25 т) с камерой сгорания | дизели автомобилей большой грузоподъемности и строительных машин (массой более 25 т) с камерой сгорания |         |                              |
|                      | 17,5   | 14,5  | 8,0                                 | 6,7                          | 6,7                                 | 6,7                                 | 6,7                                 | 6,7                                 | 6,7                                 | 700/540                             | 450/340   | -/470   | -/290   | 18,0                         |
|                      | 25,0   | 21,1  | 20,8                                | 20,8                         | 15,5                                | 20,8                                | 15,5                                | 20,8                                | 20,8                                | 980/790                             | 980/790   | 980/790   | 980/790 | 14,0                         |
| CH <sub>x</sub>      | 1,0  | 1,8   | 1,7                                 | 1,7                          | 0,96                                | 1,7                                 | 0,96                                | 1,7                                 | 0,96                                | 670/510                             | 670/510   | 670/510   | 670/510 | 3,5                          |
| Дымность ОГ          | Максимальное значение — 50 %                   | При разгоне — 20 %, при торможении — 15 %, максимальное значение — 50 % | —                                   | —                            | —                                   | —                                   | —                                   | —                                   | —                                   | —                                   | —   | —   | —       | Максимальное значение — 50 % |
| Частицы              | —  | —   | 0,8                                 | 0,33                         | 0,13                                | 0,13                                | 0,13                                | 0,13                                | 0,13                                | —                                   | —   | —   | —       | —                            |

\* Нормы даны в виде отношения максимального значения концентрации вредного вещества в ОГ к среднему значению.

Стандарты США дифференцированы по годам по линии ужесточения норм на вредные выбросы от транспортных средств с ДВС. Эти стандарты вынуждают соответствующие отрасли промышленности внедрять к заданному сроку способы и устройства, обеспечивающие соответствие транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания требованиям стандартов по токсичности и дымности ОГ.

В области токсичности ОГ двигателей разработан также стандарт СЭВ — РС4089—73 "Двигатели дизельные автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений".

Вопросы измерения дымности ОГ отражены также в международных стандартах ИСО 2534 и ИСО 3173.

## 3.2. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ И ОТРАСЛЕВЫЕ НОРМЫ И СТАНДАРТЫ

Снижение токсичности и дымности ОГ — часть широкомасштабных работ, проводимых СССР в области охраны природы, окружающей среды и улучшения использования природных ресурсов.

ГОСТ 17.0.0.01—76 "Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов. Основные положения". Этим нормативным документом установлены общие требования к решению вопросов стандартизации в области охраны природы, определены основные задачи стандартизации в этой области, даны структура и классификация систем и объектов стандартизации.

Применительно к дизелям, широко применяемым в сельскохозяйственном производстве, разработаны следующие государственные и отраслевые стандарты.

ГОСТ 19025—73, введенный в действие с 1975 г., распространяется на автомобильные дизели, проходящие периодические контрольные, ведомственные, межведомственные, государственные испытания и испытания на надежность в стендовых условиях, и устанавливает допустимую норму дымности ОГ (оптической плотности ОГ) на режимах внешней скоростной характеристики — 45 %, на режиме свободного ускорения без нагрузки дизелей без наддува — 40 %, с наддувом — 50 %.

ГОСТ 21393—75, введенный в действие с 1977 г., распространяется на грузовые автомобили и автобусы с дизелями без наддува (в т. ч. иностранные), находящиеся в эксплуатации на автомобильных дорогах СССР, и устанавливает допустимую норму дымности ОГ (оптической плотности ОГ) на режиме максимальной частоты вращения коленчатого вала холостого хода — 15 %, на режиме свободного ускорения без нагрузки — 40 % (кроме автомобилей МАЗ и КраЗ с дизелями выпуска до 01.07.1976 г., для которых величина дымности ОГ не должна превышать 60 %).

ОСТ 37.001—81, введенный в действие с 1982 г., распространяется на дизели для автомобилей полной массой свыше 3,5 т, проходящие предварительные и приемочные испытания в соответствии с

ГОСТ 14846-81, и распространяется на оценочные удельные выбросы: CO — 9,5 г/кВт · ч, CH<sub>x</sub> — 3,4 и NO<sub>x</sub> — 18,35 г/кВт · ч. Режимы испытаний и расчет оценочных удельных выбросов проводятся по 13-ступенчатому циклу (США) — см. таблицу 9.

ОСТ 23.1.440-76 и ОСТ 23.1.441-76, введенные с 1982 г., ограничивают соответственно удельные выбросы вредных веществ с ОГ и дымность тракторных и комбайновых дизелей.

ГОСТ 17.2.2.02-86 и ГОСТ 17.2.2.05-86 определяют (начиная с 1990 г.) нормы на перечисленные газовые компоненты и дымность ОГ тракторных и комбайновых дизелей.

В соответствии с ОСТ 23.1.440-76, распространяемым на тракторные и комбайновые дизели, проходящие предварительные и аттестационные стендовые испытания, нормы ранжированы по назначению двигателей. Так, допустимые оценочные удельные выбросы вредных веществ в атмосферу для тракторных дизелей составляют: по CO — 10,0 г/кВт · ч, CH<sub>x</sub> — 4,0, NO<sub>x</sub> — 22,0 г/кВт · ч; для комбайновых дизелей соответственно 12; 5 и 25 г/кВт · ч.

Особо выделены нормы на оценочные удельные выбросы перечисленных вредных веществ с ОГ дизелей, предназначенных для использования в местах с ограниченным воздухообменом (парники, животноводческие фермы и комплексы, внутрицеховая территория и т. п.), для которых оценочные удельные выбросы составляют: по CO — 4,0 г/кВт · ч, CH<sub>x</sub> — 3,0 г/кВт · ч и NO<sub>x</sub> — 13,0 г/кВт · ч. Дизели, удовлетворяющие этим нормам, принято относить к малотоксичным. Расчет оценочных удельных выбросов ведут по формуле (10) и данным таблицы 11.

По ОСТ 23.1.441-76 ограничена дымность ОГ, которая для тракторных и комбайновых дизелей при проведении стендовых испытаний не должна превышать 40 % при работе на четырех значениях частоты вращения коленчатого вала, равнорасположенных в диапазоне от  $n_{\text{ном}}$  до большей из величин  $0,6n_{\text{ном}}$  или  $n_{\text{тах кр}}$  при нагрузке, составляющей 80 %. Для дизелей, применяемых в местах с ограниченным воздухообменом, основные испытания проводят на установившемся режиме при полной нагрузке. Дымность ОГ дизеля при выполнении перечисленных условий также не должна превышать 40 %.

В соответствии с ГОСТ 17.2.2.05-86, распространяемым на тракторные и комбайновые дизели (за исключением дизелей мотоблоков и тракторов тягового класса 0,2), при проведении стендовых предварительных и аттестационных испытаний удельные выбросы не должны превышать: для дизелей сельскохозяйственных и промышленных тракторов по CO — 10,0 г/кВт · ч; для комбайновых дизелей по CO — 12,0 г/кВт · ч, CH<sub>x</sub> — 4,0, NO<sub>x</sub> — 25,0 г/кВт · ч; для дизелей, применяемых в местах с ограниченным воздухообменом, по CO — 4,0 г/кВт · ч (с нейтрализатором, установленным в выпускной системе дизеля), CH<sub>x</sub> — 2,0, NO<sub>x</sub> — 13,0 г/кВт · ч.

## 11. Испытательные циклы дизелей

| № режима | Правила ЕЭК ООН (ECE-R49) |             |                            | ОСТ 23.1.440-76*         |             | ГОСТ 17.2.2.05-86 (с 1990 г.) |             |                            |
|----------|---------------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|----------------------------|
|          | Скоростной режим          | Нагрузка, % | Коэффициент приведения (K) | Скоростной режим         | Нагрузка, % | Скоростной режим              | Нагрузка, % | Коэффициент приведения (K) |
| 1        | Холостой ход              | —           | 0,25/3                     | $n_{\text{тах кр}}^{**}$ | 0           | $n_{\text{х.х min}}$          | 0           | 0,067                      |
| 2        | Промежуточный режим       | 10          | 0,08                       | То же                    | 27,5        | $n_{\text{тах кр}}^{**}$      | 10,0        | 0,08                       |
| 3        | То же                     | 25          | 0,08                       | "                        | 55          | "                             | 27,5        | 0,08                       |
| 4        | "                         | 50          | 0,08                       | "                        | 82,5        | "                             | 55,0        | 0,08                       |
| 5        | "                         | 75          | 0,08                       | "                        | 110         | "                             | 82,5        | 0,08                       |
| 6        | "                         | 100         | 0,25                       | Номинальный режим        | 0           | "                             | 110,0       | 0,08                       |
| 7        | Холостой ход              | —           | 0,25/3                     | То же                    | 25          | $n_{\text{х.х min}}$          | 0           | 0,067                      |
| 8        | Номинальный режим         | 100         | 0,10                       | "                        | 50          | Номинальный режим             | 100,0       | 0,08                       |
| 9        | То же                     | 75          | 0,02                       | "                        | 75          | То же                         | 75,0        | 0,08                       |
| 10       | "                         | 50          | 0,02                       | "                        | 100,0       | "                             | 50,0        | 0,08                       |
| 11       | "                         | 25          | 0,02                       | "                        | —           | "                             | 25,0        | 0,08                       |
| 12       | "                         | 2...5       | 0,02                       | —                        | —           | "                             | 10,0        | 0,08                       |
| 13       | Холостой ход              | —           | 0,25/3                     | —                        | —           | —                             | 0           | 0,067                      |

\* Коэффициент приведения равен 1.

\*\* Частота вращения соответствует большей из величин  $n_{\text{тах кр}}$  или  $0,6n_{\text{ном}}$ .

Измерение выбросов нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей по ОСТ 23.1.440-76 и по ГОСТ 17.2.2.05-86 проводят на режимах, последовательно задаваемых в соответствии с данными таблицы 11, а рассчитывают по формуле (10).

По ГОСТ 17.2.2.02-86 дымность ОГ тракторных и комбайновых дизелей не должна превышать нормативных значений, указанных в таблице 12, при проведении предварительных и аттестационных стендовых испытаний по ГОСТ 18508-80.

Дымность ОГ дизелей тракторных (с трансмиссией любого вида, кроме механической ступенчатой) и комбайновых измеряют на режиме  $n_{\text{ном}}$  при 80 % максимального (для данной частоты вращения) значения крутящего момента.

Дымность ОГ дизелей, предназначенных для установки на тракторах, используемых в местах с ограниченным воздухообменом, изме-

## 12. Нормы дымности ОГ тракторных и комбайновых дизелей

| Объемный расход воздуха, поступающего в цилиндры дизеля на заданном режиме, м <sup>3</sup> /с | Нормы дымности  |   |
|---|---|---|
|   | Натуральный показатель ослабления по основной шкале дымомера (K), м <sup>-1</sup> | Коэффициент ослабления по вспомогательной (линейной) шкале дымомера с эффективной базой 0,43 м (N), % |
| 0,12 и менее  | 1,20  | 40  |
| 0,13  | 1,15  | 39  |
| 0,14  | 1,11  | 38  |
| 0,15  | 1,07  | 37  |
| 0,16  | 1,04  | 36  |
| 0,17  | 1,01  | 35  |
| 0,18  | 0,99  | 35  |
| 0,19  | 0,96  | 34  |
| 0,2 и более   | 0,93  | 33  |

ряют на установившемся режиме работы дизеля при шести значениях частоты вращения через равные интервалы от  $n_{\text{ном}}$  до большего из значений  $0,55 n_{\text{ном}}$  или  $n_{\text{max}}$  кр и максимальных значениях крутящего момента для каждой частоты вращения.

Перечисленными документами оговорены вместе с нормами и методы определения выбросов вредных веществ и дымности ОГ. Наряду с приборами и оборудованием для газового анализа и измерения дымности ОГ эти методы подробно рассмотрены в подразделе 9.1.

Следует отметить, что при использовании тракторных и комбайновых двигателей в горнорудной промышленности на них распространяются ограничения, определенные инструкцией Госгортехнадзора (Государственного управления по надзору за безопасным применением машин в горной промышленности). Нормы инструкции Госгортехнадзора для дизелей, применяемых в горной промышленности, ограничивают уровень выбросов CO и NO<sub>x</sub> с отработавшими газами. Концентрация CO в ОГ на любом возможном режиме работы дизеля не должна превышать 0,2 % (при проведении измерений в системе выпуска дизеля до нейтрализатора ОГ) и 0,08 % (после нейтрализатора). Концентрация NO<sub>x</sub> (в пересчете к NO<sub>2</sub>) — не более 0,1 %. Режимы испытаний инструкцией не регламентируются.

## 4. ОБРАЗОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ

**Общие сведения.** Содержание отдельных компонентов в отработавших газах ДВС зависит от способа их образования, разложения, а также ряда преобразований отдельных соединений в цилиндре и системе выпуска двигателя.

Существенное влияние на содержание вредных веществ в ОГ ди-

## 13. Оценочные удельные выбросы дизелей (при испытании по 13-ступенчатому циклу)

| Эффективная мощность, кВт   | Значение оценочных удельных выбросов, г/кВт · ч |                 |                 |      |         |       |
|---|---|-----------------|-----------------|------|---------|-------|
|   | CO  | NO <sub>x</sub> | CH <sub>x</sub> | RCHO | Частицы | Запах |
| <i>Четырехтактный двигатель с непосредственным впрыскиванием, без наддува</i>     |   |                 |                 |      |         |       |
| 25,3  | 13,6  | 11,8            | 2,6             | 0,7  | 0,8     | 6,1   |
| 39,4  | 5,7   | 9,1             | 4,2             | 0,55 | 0,8     | 4,9   |
| 42,0  | 7,9   | 26,6            | 4,1             | 0,55 | 0,14    | 5,4   |
| 42,7  | 6,7   | 22,7            | 4,2             | —    | —       | 6,0   |
| 50,0  | 7,6   | 12,9            | 3,1             | 0,4  | 0,3     | 6,1   |
| 53,8  | 7,7   | 9,4             | 0,8             | —    | —       | 4,1   |
| <i>Четырехтактный двигатель с непосредственным впрыскиванием, с турбонаддувом</i> |   |                 |                 |      |         |       |
| 57,6  | 5,3   | 24,3            | 4,2             | 0,3  | 0,3     | —     |
| 62,9  | 6,7   | 15,9            | 3,5             | 0,3  | 0,4     | 4,9   |
| <i>Четырехтактный двигатель предкамерный с турбонаддувом</i>                      |   |                 |                 |      |         |       |
| 65,1  | 3,1   | 8,3             | 0,4             | 0,14 | 0,5     | 4,5   |
| <i>Двухтактный двигатель с непосредственным впрыскиванием</i>                     |   |                 |                 |      |         |       |
| 36,3  | 8,3   | 20,0            | 0,9             | —    | —       | 4,5   |

зеля оказывают конструктивные и рабочие параметры. В таблице 13 представлены оценочные удельные выбросы ряда дизелей при их испытании по 13-ступенчатому циклу [61].

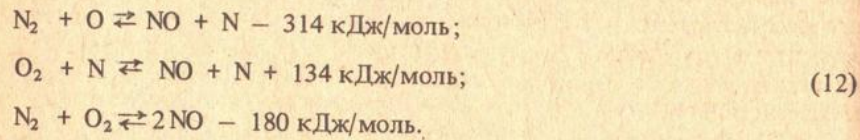
Из приведенных в таблице 13 данных следует, что в ОГ дизелей наибольшее количество удельных выбросов приходится на долю NO<sub>x</sub>, CO и CH<sub>x</sub>. С учетом гигиенической оценки индивидуального состава ОГ дизелей можно выделить следующие основные группы токсичных веществ: NO<sub>x</sub>, С, БП, CO, CH<sub>x</sub> и RCHO.

**Оксиды азота.** Несмотря на то что окись азота (NO) и двуокись (NO<sub>2</sub>) обычно объединяются вместе как оксиды азота (NO<sub>x</sub>), в цилиндрах дизеля в значительных количествах образуется только NO. Разработано большое количество моделей механизма ее образования. Однако общепринята модель, разработанная на основании теории Н. Н. Семенова — Я. Б. Зельдовича — Д. А. Франк-Каменецкого. Необходимое условие окисления NO — диссоциация молекулы кислорода, идущая с поглощением теплоты:



Атомарный кислород взаимодействует с молекулой азота также с поглощением теплоты, а образовавшийся в результате эндотермичес-

кой реакции атомарный азот реагирует с молекулярным кислородом с выделением теплоты по экзотермической реакции:



Скорость суммарной реакции (12) определяется следующим уравнением:

$$\frac{d\text{NO}}{d\tau} = K_1 \text{N}_2 \text{O}_2 - K_2 [\text{NO}]^2, \quad (13)$$

где  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  — соответственно концентрации азота и кислорода,  $\text{г/м}^3$ ;  $[\text{NO}]$  — равновесная концентрация  $\text{NO}$ ,  $\text{г/м}^3$ ;  $K_1$ ,  $K_2$  — константы скорости прямых и обратных реакций.

При условии  $d\text{NO}/d\tau = 0$  равновесная концентрация окиси азота получается при известных значениях констант в следующем виде:

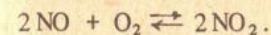
$$[\text{NO}] = 4,6 \sqrt{\text{O}_2 \text{N}_2} \exp\left(-\frac{90 \cdot 10^3}{RT}\right). \quad (14)$$

Из (14) следует, что равновесная концентрация  $\text{NO}$  более  $1 \text{ г/м}^3$  будет при температуре более  $1600^\circ\text{C}$  и удваивается при повышении температуры через каждые  $200\dots 250^\circ\text{C}$ . В отличие от других токсичных компонентов ОГ дизеля, являющихся продуктами неполного сгорания топлива, его частичного окисления и термического разложения, образование  $\text{NO}$  не связано непосредственно с реакциями горения, а имеет термическую природу. Анализ реакции показывает, что атомы азота не начинают цепной реакции, так как их равновесная концентрация во время горения низка по сравнению с равновесной концентрацией атомарного кислорода. Поэтому в дизеле при горении локальное образование  $\text{NO}$  в области топливной струи связано с концентрацией атомов кислорода, которая зависит от концентрации кислорода в каждой локальной зоне и температуры в ней.

В камере сгорания (КС) дизеля из-за низкой температуры смеси во время такта сжатия  $\text{NO}$  не образуется. При горении топлива в ядре струи и пленки топлива на стенке увеличивается средняя температура в цилиндре, что приводит к повышению концентрации  $\text{NO}$  в зонах бедной смеси и в оставшемся воздухе. В свою очередь, при более высокой температуре пламени в ядре образование  $\text{NO}$  зависит от локальной концентрации кислорода. Во время хода расширения уровень концентрации  $\text{NO}$  практически не изменяется, несмотря на снижение температуры в цилиндре двигателя.

Известно, что незначительные количества оксидов азота оказывают существенное влияние на пиролиз углеводородов и на фотохимические реакции, а также на сгорание углерода. Поэтому наличие  $\text{NO}_x$  во впускном заряде может оказывать заметное влияние на характеристики процесса сгорания и образование токсичных веществ. Это влияние зависит от количества  $\text{NO}_x$ , поступающего с остаточными газами во впускной заряд, а также от чувствительности различных процессов к воздействию  $\text{NO}_x$ .

В ОГ содержится до 10 различных оксидов азота. Перекиси типа  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_6$ ,  $\text{N}_3\text{O}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}_7$  мгновенно распадаются до  $\text{NO}_2$  и кислорода. Однако, как правило, более 95 % образовавшихся оксидов азота приходится на долю  $\text{NO}$ . При температурах ниже  $400^\circ\text{C}$  окись азота начинает окисляться до двуокиси  $\text{NO}_2$  по следующей реакции:

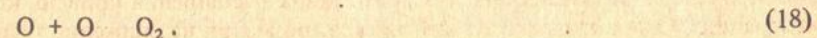
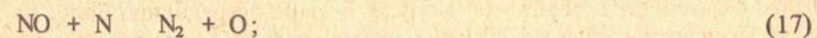
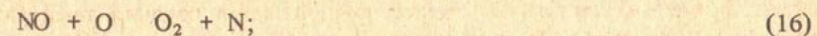


Во время рабочего процесса возможны реакции  $\text{NO}_x$  с  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . Однако гораздо легче идут реакции азота с водой или  $\text{CO}_2$ . Поэтому  $\text{NO}$  фактически единственная из оксидов азота, которая играет определенную роль в процессе сгорания дизеля. Количество  $\text{NO}$  в ОГ практически соответствует их образовавшемуся количеству при максимальных температурах цикла. Вид топлива не оказывает заметного влияния на образование  $\text{NO}$  при прочих равных условиях. Наибольшее количество  $\text{NO}$  образуется при работе двигателя на топливе с ароматическими углеводородами, а наименьшее — при работе на парафиновых топливах. Другие топлива в этом смысле являются промежуточными.

При больших температурах скорость реакции высока и равновесие устанавливается быстро. В процессе расширения по мере уменьшения температуры скорость реакции быстро падает. Равновесная постоянная в конце концов снижается до нуля (или почти до нуля) к концу расширения. Поскольку при расширении равновесие  $\text{NO}$  снижается, скорость распада  $\text{NO}$  является ограничивающим кинетическим параметром. Бимолекулярный механизм распада  $\text{NO}$  можно представить следующей реакцией:



При высоких температурах распад идет по механизму Зельдовича Я. Б.:



При реальных процессах сгорания в дизеле действуют оба механизма. Бимолекулярный механизм доминирует при низких температурах (до 1230 °С), а механизм Зельдовича Я. Б. при более высоких.

Сажа. В ОГ дизеля содержатся следующие виды частиц:

жидкие частицы, содержащиеся в основном топливо и часть смазочного масла, несгоревшие в цилиндре, а также продукты неполного сгорания;

сажа как продукт неполного сгорания, особенно при максимальных нагрузках дизеля; другие частицы, включающие в себя топливные присадки и компоненты смазочного масла;

частицы металлов.

В дальнейшем будут рассматриваться только вопросы, касающиеся сажи, дымности ОГ, а также содержания в частицах сажи полициклических углеводородов (на примере канцерогенного бенз(а)пирена).

Частицы сажи представляют собой агломерированные частицы углерода неправильной формы с линейными размерами 0,3...100 мкм [15]. Первичные структуры сажи, образующиеся в камерах сгорания дизелей, являются частицами сферической формы диаметром 0,015...0,17 мкм с удельной геометрической поверхностью до 75 м<sup>2</sup>/г, которые из-за коагуляции в процессе сгорания образуют вторичные и третичные структуры, выбрасываемые с ОГ из системы выпуска дизеля в атмосферу.

В соответствии с последними исследованиями частицы углерода образуются в процессе пиролиза молекул в паровой фазе, происходящего в высокотемпературной центральной зоне топливной струи, где содержание кислорода недостаточно. Механизм образования сажи очень сложен, недостаточно изучен и связан с большим числом химических реакций. В общем случае он представляет собой последовательность процессов разложения углеводородных топлив, образования активных углеродных частиц в пламени, роста ядер сажи, агломерации частиц и, наконец, окисления сажи. Содержание сажи в ОГ дизеля зависит от всех перечисленных процессов, из которых наиболее изучен только последний.

При температурных условиях, типичных для пламени, в дизеле предшественниками появления сажи являются наиболее неустойчивые радикалы молекул углеводорода [15, 62, 63]. Рост первичных частиц сажи во время сгорания топлива протекает очень быстро в наиболее горячих зонах пламени. По мнению японских исследователей [62], основной параметр, определяющий образование частиц сажи, — уровень температур локальных зон пламени вокруг дискретных капель топлива. Образование сажи максимально при температуре горения около 1880 °С и уменьшается как при снижении, так и при увеличении температуры. По их мнению, при температуре горения ниже 1700 °С и выше 2130 °С условия для сажеобразования отсутствуют, однако

именно интервал 1730...2030 °С является основным в процессе сгорания топлива в дизеле.

Последующая за стадией образования частиц сажи коагуляция этих частиц — это физический процесс, а идущий за ней окислительный процесс в основном связан с горением частиц сажи при наличии атомов кислорода.

Таким образом, содержание сажи в ОГ зависит от типа топлива, структуры топливного факела и его взаимодействия с воздушным потоком и стенками камеры сгорания, формы последней, температуры пламени и является результатом протекания двух определяющих процессов — образования и окисления, которые, в свою очередь, зависят от особенностей конструкции двигателя и режимов его работы.

Некоторые исследователи отмечают, что частицы углерода могут образовываться и в присутствии кислорода. Так, пиролиз топлива с образованием углерода зарегистрирован на ранних стадиях горения в бедных зонах, а при работе дизеля на малых нагрузках — и в ядре струи [61]. Однако вследствие избытка кислорода в указанных условиях образовавшиеся частицы сажи затем полностью сгорают. Пиролиз молекул в ядре струи при работе двигателя на больших нагрузках в условиях дефицита кислорода, высокой температуры газа и большого содержания углеводородов с высокой температурой кипения приводит к образованию ацетилена и водорода. В этом случае образование сажи связано с одновременной конденсацией и дегидрогенизацией ацетилена. Таким образом, сажа образуется и из топлива, попадающего на стенки камеры сгорания.

Образовавшиеся частицы сажи интенсивнее окисляются в турбулентном пламени, формирующемся на стадии горения топлива. В целом протекание реакций окисления зависит от концентрации кислорода вблизи поверхности частиц сажи, от температуры и времени пребывания. Атомы кислорода играют важную роль в догорании сажи, активность атомов кислорода мало зависит от природы и микроструктуры частиц сажи [61]. Уровень дымности ОГ дизелей в большей мере зависит от следующих факторов: типа топлива, угла опережения начала впрыскивания топлива, скорости и продолжительности впрыскивания топлива, геометрических параметров распылителя форсунки, температуры впускного воздуха и топлива, подтекания и подвпрысков топлива, применения наддува, охлаждения наддувочного воздуха, антидымных присадок, закона и организации процессов топливоподачи, переходных режимов работы двигателя, эксплуатационных факторов и регулирования.

Данные по результатам исследования процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля и по склонности к образованию сажи из различных углеводородных топлив [16] приведены на рисунке 2. По мере увеличения коэффициента избытка воздуха ( $\alpha > 1,4...1,5$ ) и интенсивности турбулизации рабочего заряда в КС увеличивается

количество догорающей сажи в цилиндре дизеля на такте расширения. Процесс догорания сажи продолжается и в выпускном трубопроводе двигателя, причем тем интенсивнее, чем выше температура ОГ. Последнее обстоятельство является одной из причин несопоставимости результатов исследований, производимых в различных точках выпускного трубопровода.

Склонность топлив к сажеобразованию характеризуется предельной высотой пламени ( $h_k$ ), соответствующей моменту начала появления сажи, а также величиной  $a/h_k$ , где  $a$  — постоянный коэффициент (см. рис. 2, б). Наиболее склонны к образованию сажи тяжелые ароматические углеводороды (нафталин, бензолы и т. д.). Парафины (алканы) наименее склонны к сажеобразованию. Однако период задержки воспламенения топлива разного состава может оказывать более значимое влияние на протекание процессов образования и окисления сажи, чем вид топлива.

На рисунке 3, а и б представлены данные по изменению содержания сажи в ОГ и ее выбросов в атмосферу (рис. 3, в и г) для двух типов двигателей [дизеля с неразделенной камерой сгорания, работающего по М-процессу (М), и вихрекамерного дизеля (В)] в зависимости от режима работы двигателя (частоты вращения коленчатого вала  $n$  и мощности) [64]. Из представленных данных следует, что сажесодержание ОГ вихрекамерного дизеля возрастает по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала в области повышенных  $n$  (близких к номинальным), а в дизеле с неразделенной камерой сгорания оно в первую очередь зависит от нагрузки.

Для вихрекамерного дизеля возрастание выброса твердых частиц так же, как и сажесодержание, наблюдается при увеличении частоты вращения. Для дизеля с неразделенной камерой сгорания с М-процессом (М) максимальные значения сажесодержания и выброса частиц находятся на одинаковых режимах, однако при максимальной частоте вращения коленчатого вала режима холостого хода наблюдается дополнительный выброс частиц.

Исследования с помощью растрового электронного микроскопа позволили установить, что фильтры на этом режиме задерживают относительно небольшое количество частиц сажи, а отложения представляют собой высококипящие углеводородные соединения, которые регистрируются как твердые частицы, не оказывающие влияния на показания сажемера.

Увеличение относительной доли углеводородов в общей массе частиц при невысоких температурах ОГ (при небольших нагрузках и на режиме холостого хода) — характерное явление, подтверждаемое и другими исследователями (рис. 4) [64].

**Бенз(а)пирен.** Из множества полициклических ароматических углеводородов, обладающих канцерогенным действием, в ОГ дизеля в наибольших количествах содержится бенз(а)пирен, который

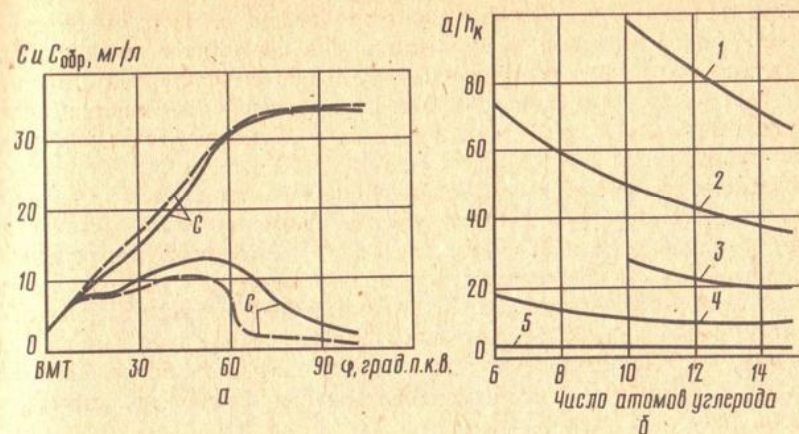


Рис. 2. Влияние некоторых параметров на содержание сажи в ОГ дизеля:

а — влияние угла поворота коленчатого вала ( $\varphi$ ) на количество образовавшейся ( $C_{собр}$ ) и оставшейся ( $C$ ) сажи в ОГ дизеля ( $p_e = 0,71$  МПа): — — при работе на дизельном топливе; - - - - при работе на дизтопливе с присадкой 0,05% ЦТМ; б — влияние склонности ряда топлив к сажеобразованию: 1 — нафталины; 2 — бензолы; 3 — диолефины и дициклические нафтенны; 4 — олефины и моноциклические нафтенны; 5 — алканы

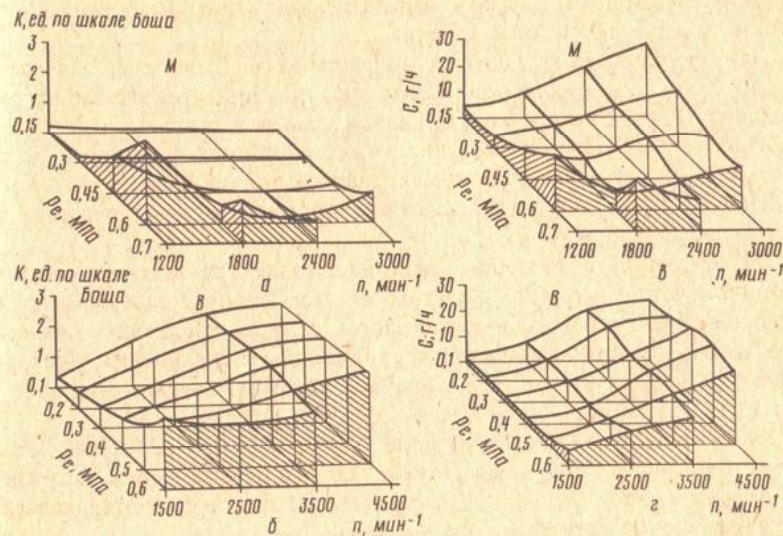


Рис. 3. Сажесодержание в ОГ ( $K$ ), выброс частиц ( $G_c$ ) в зависимости от режимов работы дизелей:

а и в — дизеля с М-процессом (М); б и г — вихрекамерного дизеля (В)

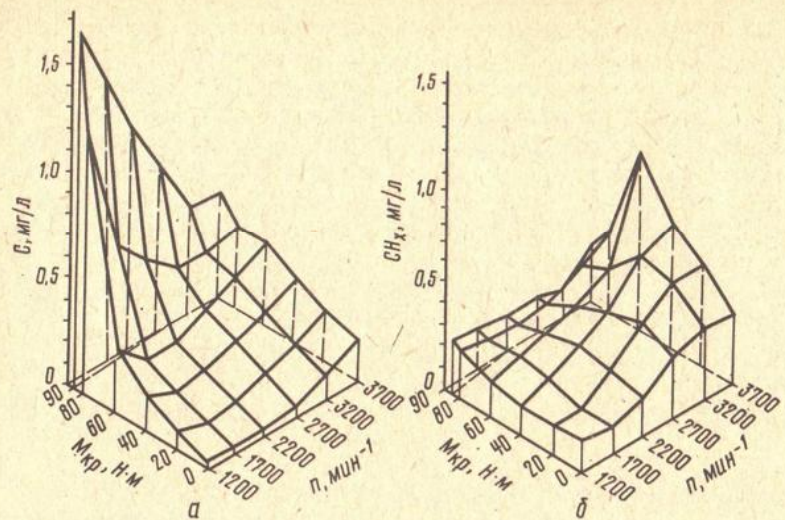


Рис. 4. Содержание C и CH<sub>x</sub> в ОГ в зависимости от режимов работы дизелей с непосредственным впрыскиванием:  
а – содержание C; б – содержание CH<sub>x</sub>

одновременно и наиболее токсичен. Поэтому канцерогенные свойства ОГ принято характеризовать БП. Он образуется при температурах 400...700 °С в условиях дефицита кислорода в результате пиролиза тяжелых фракций топлива и смазочного масла.

Бенз(а)пирен хорошо адсорбируется и удерживается на дизельной саже. Считают, что применение методов, снижающих содержание

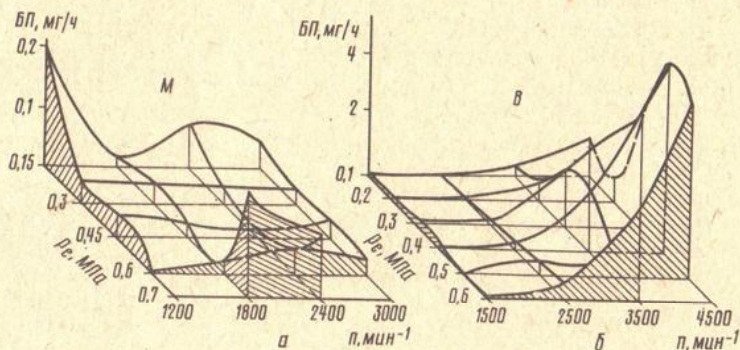


Рис. 5. Выбросы (G<sub>БП</sub>) с ОГ в зависимости от режима работы дизелей:  
а – с непосредственным впрыскиванием, работающего по М-процессу; б – вихрекамерного

в ОГ сажи, приводит и к уменьшению содержания в ОГ бенз(а)пирена. Изменение содержания БП в зависимости от режимов работы дизеля с непосредственным впрыскиванием, работающего по М-процессу (М), и вихрекамерного дизеля (В) представлено на рисунке 5 [64].

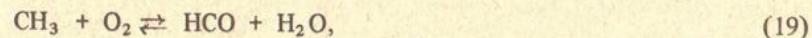
Между концентрацией в ОГ сажи (ед. по шкале Боша), частиц (мг/м<sup>3</sup>), суммарной концентрацией всех полициклических ароматических углеводородов, мутагенов и БП для дизеля с непосредственным впрыскиванием и вихрекамерного дизеля получены [64] корреляционные зависимости (табл. 14).

14. Корреляционные зависимости концентрации сажи, частиц, ПАУ, мутагенов и БП для дизелей различных типов

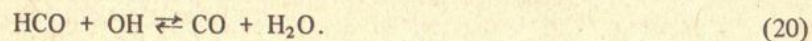
| Коэффициент корреляции r | Концентрация |      |           |      | Тип дизеля |               |
|--------------------------|--------------|------|-----------|------|------------|---------------|
|                          | частиц       | ПАУ  | мутагенов | БП   |            |               |
| Концентрация             | сажи         | 0,93 | 0,84      | 0,77 | 0,72       | Вихрекамерный |
|                          | частиц       | 0,80 | 0,66      | 0,39 | 0,42       | С М-процессом |
|                          | ПАУ          |      | 0,80      | 0,67 | 0,66       | Вихрекамерный |
|                          | мутагенов    |      | 0,52      | 0,44 | 0,45       | С М-процессом |
| Концентрация             | ПАУ          |      |           | 0,97 | 0,93       | Вихрекамерный |
|                          | мутагенов    |      |           | 0,81 | 0,84       | С М-процессом |
|                          |              |      |           | 0,97 | 0,97       | Вихрекамерный |
|                          |              |      |           | 0,99 | 0,99       | С М-процессом |

Для вихрекамерного дизеля найдена хорошая корреляционная сходимость по всем перечисленным группам веществ, а для дизеля с М-процессом неплохая корреляция получена только между концентрациями сажи и ПАУ и удовлетворительная – между сажей и частицами. Для указанных двигателей весьма хорошо коррелируются между собой концентрации ПАУ, мутагенов и БП.

**Оксид углерода.** Реакция догорания окиси (оксида) углерода – конечная стадия реакции горения углеводородов. Она образуется как промежуточный продукт химической реакции углеродсодержащего топлива с кислородом. Промежуточной реакцией принято считать реакцию метильного радикала с молекулярным кислородом:



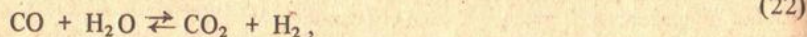
после которой СО образуется в основном по реакции:



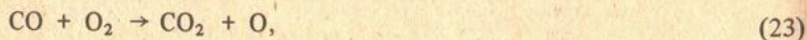
В меньшей степени СО образуется по реакции:



Механизм превращения CO в CO<sub>2</sub> также сложен и до конца не изучен. Основными считают следующие реакции:



хотя может идти и прямая реакция:



которая, однако, большой роли в цилиндрах дизеля не играет.

Рассмотренные механизмы элементарных реакций нельзя считать абсолютно строгими, так как они до конца не изучены. Тем не менее принятые упрощенные модели позволяют с достаточной для практических целей точностью оценить и объяснить наблюдаемые явления. В цилиндрах дизеля CO образуется в большей мере по следующим причинам:

из-за неполного смешивания топлива с воздухом в зоне горения топлива, так как неравномерное распределение топлива в зоне факела определяет наличие отдельных участков с богатой смесью;

вследствие возникновения CO в высокотемпературных зонах топливного факела, в которых химическое равновесие смещено в сторону диссоциации двуокиси углерода.

На рисунке 6 показана схема образования зон, богатых CO, являющихся одной из причин содержания окиси углерода в ОГ из-за недогорания части топлива в цилиндрах дизеля.

**Углеводороды.** Углеводороды в ОГ дизеля состоят из исходных или промежуточных соединений углеводородов топлива. Они образуются в зонах срыва пламени, в ядре и хвосте струи, на топливной пленке на стенках и в результате вторичного впрыскивания топлива в КС. Механизм образования углеводородов зависит от конструкции двигателя и параметров его работы.

Одна из основных причин наличия углеводородов в ОГ дизелей — наличие холодных пристеночных слоев в КС и зазорах у стенок цилиндра.

На рисунке 7 показана схема образования холодных пристеночных слоев, богатых углеводородами. При работе двигателя в процессе сгорания топлива пламя распространяется к стенке, от которой отводится теплота, а радикалы на стенке рекомбинируют. Несгоревшая часть топлива в холодной зоне у стенки цилиндра и около поверхностей головки цилиндров и поршня гасит реакции, в результате чего в пристеночных холодных слоях цилиндров толщиной 0,005...0,3 мм (в зависимости от температурного режима) остаются углеводородные частицы из нагретого, не до конца сгоревшего топлива [64, 65].

При работе дизеля на холостом ходу и частичных нагрузках основная доля топлива не достигает стенок КС и его концентрация в ядре

Рис. 6. Схема образования зон, богатых CO:

1 — поршень; 2 — несгоревшая топливовоздушная смесь; 3 — частично сгоревшая топливовоздушная смесь; 4 — холодный пристеночный слой; 5 — стенка цилиндра; 6 — зазор с холодным пристеночным слоем; 7 — поршневое кольцо

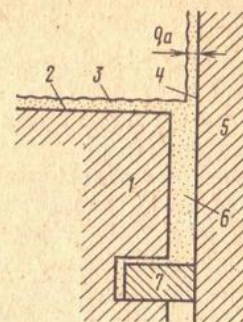
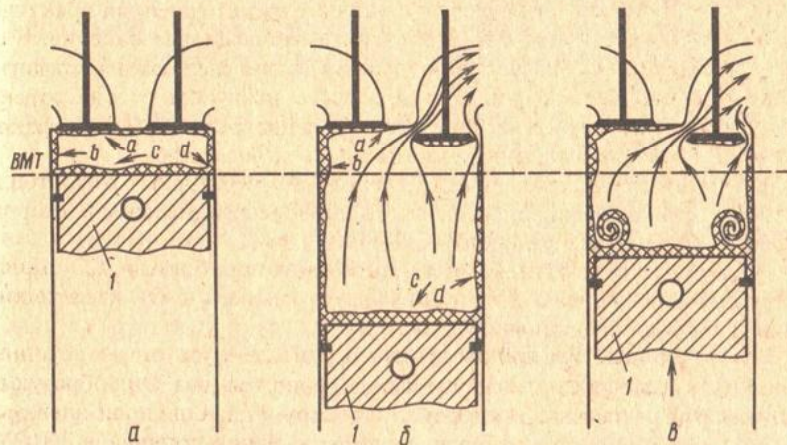


Рис. 7. Схема образования холодных пристеночных слоев у дизеля:

a — положение поршня в ВМТ; б — положение поршня в НМТ; в — положение поршня в такте выпуска ОГ; б, с, d, e — пристеночные слои, богатые углеводородами; 1 — поршень



струи невысока. В этих условиях основным источником несгоревших углеводородов являются зоны бедного срыва пламени. По мере увеличения нагрузки количество топлива, попадающее на стенки КС, а также в ядре струи увеличивается. Количество несгоревших углеводородов, образующихся в перечисленных зонах, растет. На средних нагрузках дизеля содержание кислорода в топливовоздушной смеси высоко, и с увеличением температуры при сгорании топлива реакции окисления ускоряются, выход углеводородов снижается.

На режимах, близких к номинальным, при образовании в ядре и у стенок КС большого количества несгоревших углеводородов удельный вклад зон бедного срыва пламени в общее количество углеводородов ОГ невелик, а реакции окисления из-за дефицита кислорода также ограничены, несмотря на наличие высоких температур. По этим причинам наблюдается увеличение относительной доли углеводородов на максимальных нагрузках.

Максимальное количество углеводородов, содержащихся в ОГ,



в зависимости от нагрузки дизеля сильно изменяется на холостом ходу из-за бедного срыва пламени. Углеводороды ОГ в основном состоят из молекул исходного топлива, т. е. высокомолекулярны. По мере увеличения нагрузки уровень температур рабочего процесса заметно увеличивается. Богатая смесь топлива с воздухом в ядре струи и вблизи стенок КС при взаимодействии с воздухом, с одной стороны, приводит к увеличению догорания молекул среднего размера с образованием более легких углеводородов вплоть до конечных составляющих —  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а с другой — вызывает рекомбинацию промежуточных соединений с образованием даже более тяжелых молекул, чем были в исходном топливе.

Эффективные средства снижения выброса с ОГ углеводородов: применение турбонаддува; увеличение установочного угла опережения впрыскивания топлива; увеличение до оптимального значения вихревого движения воздуха в КС;

конструктивные особенности КС, газодинамические характеристики систем впуска и выпуска;

конструкция и параметры системы топливоподачи.

Альдегиды образуются при протекании предпламенных реакций в период подготовки топливоздушной смеси к сгоранию, особенно при низких температурах процесса окисления топлива. В ОГ дизелей идентифицировано более 200 различных альдегидов, из которых преобладают акролеин и формальдегид. Наибольшие концентрации альдегидов в ОГ отмечаются при работе дизеля на малых нагрузках. Фирмой MAN (ФРГ) установлено, что на концентрацию альдегидов в ОГ основное влияние оказывает температура впускного заряда в конце такта сжатия. Так, увеличение этой температуры с 500 до 600 °С и с 500 до 700 °С на дизеле с непосредственным впрыскиванием при работе на холостых оборотах позволяет уменьшить их концентрацию в ОГ соответственно на 75 и 90% [66].

Надо отметить, что надежной стандартизированной методики анализа альдегидов в ОГ в СССР до сих пор не разработано.

## 5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОКСИЧНОСТЬ И ДЫМНОСТЬ

### 5.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ

**Нагрузка дизеля.** По мере роста нагрузки дизеля увеличивается максимальная температура цикла и уменьшается коэффициент избытка воздуха. В результате при увеличении нагрузки эти два фактора, противоположно влияющие на образование  $\text{NO}_x$ , приводят к характерной закономерности образования оксидов азота. На рисунке 8 представлены диапазоны изменения и концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}$  и дымности

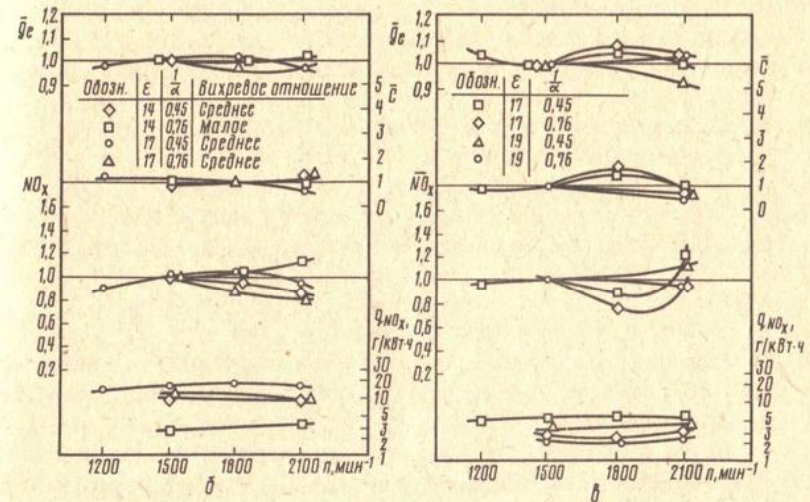
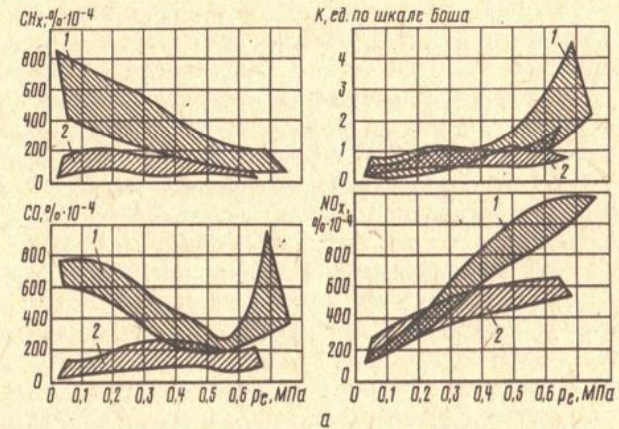


Рис. 8. Влияние параметров дизелей на токсичность и дымность ОГ:

*a* — сравнительная токсичность дизелей фирмы "Deutz" с непосредственным впрыскиванием топлива и с разделенной КС: 1 — дизель F12L413 с непосредственным впрыскиванием топлива ( $n = 1000 \dots 2500 \text{ мин}^{-1}$ ); 2 — дизель F8L413 с разделенной камерой ( $n = 1000 \dots 2650 \text{ мин}^{-1}$ ); *б* — влияние частоты вращения у дизеля с непосредственным впрыскиванием; *в* — влияние частоты вращения у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25%);  $g_e$ ,  $C$ ,  $\text{NO}_x$  — относительное изменение параметра;  $q_{\text{NO}_x}$  — удельный выброс

ОГ современных зарубежных дизелей "Deutz" [67] с различными способами смесеобразования в зависимости от нагрузки. По мере ее увеличения количество продуктов неполного сгорания в ОГ увеличивается. При увеличении  $p_e > 0,5$  МПа увеличивается и дымность ОГ дизелей. Концентрация  $\text{NO}_x$  по мере роста нагрузки сначала возрастает (до  $p_e = 0,5 \dots 0,6$  МПа), затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться. При увеличении нагрузки до 70...85 % ( $p_e$  до 0,5...0,6 МПа) увеличение  $\text{NO}_x$  связано с ростом максимальных температур. При дальнейшем увеличении нагрузки на темп образования  $\text{NO}_x$  в основном влияет концентрация кислорода в заряде.

Дизели с *M*-процессом по содержанию в ОГ  $\text{NO}_x$  близки к дизелям с объемным смесеобразованием. На малых нагрузках и при работе дизелей на холостых ходах в ОГ всех типов дизелей содержится достаточно большое количество  $\text{CH}_x$ . При увеличении нагрузки до  $p_e = 0,3 \dots 0,5$  МПа их концентрация достигает минимума и затем по мере увеличения нагрузки начинает вновь возрастать. Это связано с тем, что на малых нагрузках на образовании  $\text{CH}_x$  сказывается относительно низкий температурный уровень рабочего цикла дизеля, поскольку наблюдается значительное недогорание топлива. На больших нагрузках их рост связан также с недогоранием топлива, но уже в связи со снижением количества кислорода в смеси. Аналогичная картина характерна и для СО.

**Частота вращения коленчатого вала.** Изменение частоты вращения коленчатого вала дизеля от 800 до 2400  $\text{мин}^{-1}$  приводит к сокращению периода между положениями поршня от ВМТ до  $60^\circ$  после ВМТ с 15 до 5 м/с. В результате сокращения этого периода теплоотдача в стенки на каждый цикл уменьшается, что приводит к увеличению температуры цикла.

При увеличении  $n$  скорость сгорания также увеличивается, но не настолько, чтобы компенсировать увеличение частоты вращения, т. е. относительная продолжительность процесса сгорания увеличивается. Высокие скорости поршня при увеличенной частоте вращения коленчатого вала вызывают увеличение турбулентности воздушного заряда, но ухудшают наполнение цилиндров. При этом также увеличивается давление впрыскивания топлива, а результате чего топливо распыляется более качественно. Таким образом, влияние частоты вращения на процесс сгорания противоречивое и характеризуется многочисленными факторами, усиливающими и уменьшающими образование  $\text{NO}_x$ . Точную аналитическую оценку этого параметра осуществить очень сложно, так как он зависит от особенностей параметров рабочего процесса каждого дизеля.

Конечное влияние частоты вращения на выброс дизелями  $\text{NO}_x$  известно. Увеличение частоты вращения коленчатого вала большинства дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива приводит к снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и увеличению  $g_e$  (рис. 8, б) [67].

Закономерность выброса  $\text{NO}_x$  в дизелях с разделенной КС — обратная (рис. 8, в). В целом увеличение частоты вращения коленчатого вала незначительно влияет на выбросы дизелями  $\text{NO}_x$ .

При увеличении частоты вращения наблюдается рост содержания в ОГ дизелей БП, образование которого в значительной мере определяется условиями догорания промежуточных продуктов реакции углеводородных топлив.

**Степень сжатия.** Увеличение степени сжатия ( $\epsilon$ ) приводит к увеличению температуры впускного заряда после сжатия, что ускоряет подготовку топливовоздушной смеси и интенсифицирует процессы смесеобразования и сгорания. Степень сжатия влияет на скорость смесеобразования за счет воздействия на процесс вихреобразования при впрыскивании топлива и положении поршня в ВМТ. В результате при увеличении  $\epsilon$  топливо интенсивно смешивается и сгорает при увеличенной максимальной температуре. Увеличение температурного цикла рабочего процесса дизеля при прочих равных условиях увеличивает образование  $\text{NO}_x$  и снижает выброс сажи и продуктов неполного сгорания. Это подтверждено экспериментально [67] на примере дизелей с непосредственным впрыскиванием (рис. 9, а). Однако у предкамерных дизелей с непосредственным впрыскиванием в связи с двухстадийным сгоранием и увеличением теплоотдачи между стадиями увеличение  $\epsilon$  оказывает обратное воздействие на образование токсичных компонентов — снижается образование  $\text{NO}_x$  и увеличивается выброс сажи (рис. 9, б).

**Вихреобразование.** Увеличение вихреобразования улучшает процессы испарения, смесеобразования и сгорания в дизеле. Топливоздушная смесь становится более гомогенной, и образование  $\text{NO}_x$  увеличивается (рис. 9, в). При этом увеличению  $\text{NO}_x$  способствует (вследствие улучшения подготовки топливовоздушной смеси) раннее тепловыделение (при положении поршня в ВМТ) до охлаждения смеси за счет хода расширения. В этом случае при сгорании капелек топлива наблюдается более быстрое выделение теплоты по сравнению с его отводом. Одновременно увеличивается и диффузия кислорода к парам топлива, что увеличивает догорание сажи и продуктов неполного сгорания во время хода расширения. Рост степени вихреобразования интенсифицирует процесс смесеобразования, улучшает экономические показатели двигателя ( $g_e$ ), снижает выброс СО, сажи и приводит к увеличению образования  $\text{NO}_x$ . Следует заметить, что чрезмерное перевихривание приводит вновь к ухудшению процесса сгорания.

Аналогичные результаты получены на дизелях с разделенной КС цилиндрической и тороидальной формы. Оптимальный подбор вихря в дизелях различных конструкций — один из действенных резервов снижения токсичности ОГ и улучшения мощностных и экономических показателей.

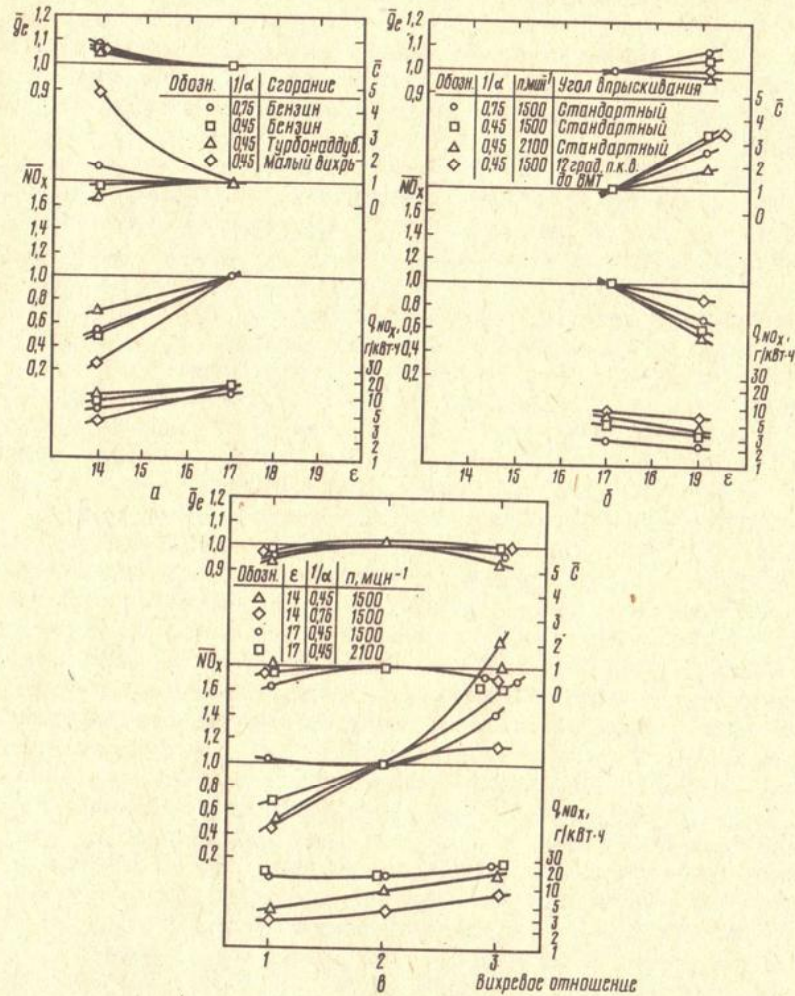


Рис. 9. Влияние параметров дизелей на токсичность и дымность ОГ:  
 а – влияние степени сжатия у дизеля с непосредственным впрыскиванием ( $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ); б – влияние степени сжатия у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25%); в – влияние вихревого отношения у дизеля с непосредственным впрыскиванием

**Термодинамические параметры впускной смеси.** Определенное влияние на токсичность дизелей оказывают термодинамические параметры впускного заряда, из которых основные – температура впускного воздуха, температура охлаждающей воды, температура впрыскиваемого в цилиндры топлива, давление воздуха на впуске.

**Эффект температуры впускного воздуха.** При увеличении температуры воздуха на впуске на  $60^\circ\text{C}$  температура в конце такта сжатия повышается на  $175^\circ\text{C}$ . При этом ухудшается наполнение цилиндров и увеличиваются тепловые потери во время такта сжатия, т. е. в реальном процессе вследствие этого температура в конце такта сжатия увеличивается не на  $175^\circ\text{C}$ , а меньше. Ее рост приводит к значительному увеличению максимальной температуры цикла. В таких условиях скорость образования  $\text{NO}_x$  увеличивается в 2 раза, однако выброс  $\text{NO}_x$  увеличивается только на 10–15% (см. рис. 10, а, б).

Температура впускного воздуха практически не оказывает влияния на выброс сажи. С одной стороны, при увеличении ее лучше происходит испарение впрыснутого топлива, что уменьшает образование сажи, а с другой стороны, снижение плотности впускного воздушного заряда и увеличение температуры в конце такта сжатия и максимальной температуры цикла приводят к увеличению пиролиза топлива. Эти эффекты в первом приближении компенсируют один другой.

Аналогичное влияние на токсичность оказывает и температура охлажденной воды (жидкости) в системе охлаждения дизеля. Снижение температуры охлаждающей воды приводит к увеличению весового заряда, поступающего в цилиндры, увеличивает  $\alpha$ , снижает температуру впускной смеси в конце такта сжатия и максимальную температуру цикла. Несмотря на увеличение  $\alpha$ , снижение общей температуры цикла в итоге приводит к уменьшению концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля.

**Давление воздуха на впуске.** На рисунке 10, в и г показано влияние турбонаддува с промежуточным охлаждением на выброс  $\text{NO}_x$ , относительное изменение  $\text{NO}_x$ , сажи и  $g_c$ . Турбонаддув с промежуточным охлаждением существенно увеличивает плотность воздушного заряда, что приводит к увеличению полноты сгорания топлива, снижает задержку впрыскивания и изменяет дальность топливной струи. Промежуточное охлаждение не приводит к заметному изменению температуры воздуха на впуске, а следовательно, и температуры пламени, и поэтому уровень изменяется незначительно. Однако при применении наддува снижается удельный расход топлива, а следовательно, и удельный выброс  $\text{NO}_x$ , что и приводит к снижению токсичности ОГ дизелей при применении наддува.

Одновременно со снижением удельного выброса  $\text{NO}_x$  для дизелей с наддувом характерен вследствие увеличения  $\alpha$  очень низкий выброс углеводородов, СО и самый низкий уровень дымления.

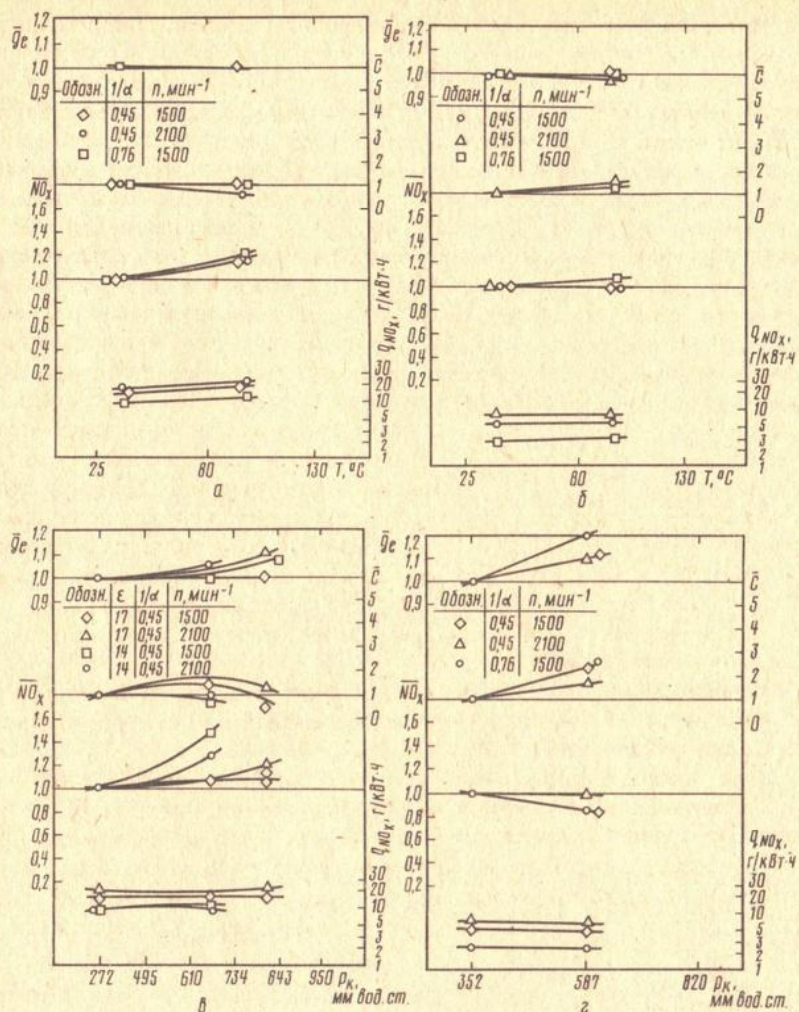


Рис. 10. Влияние параметров воздушного заряда на впуске дизеля на токсичность и дымность ОГ ( $\epsilon = 17$ ):

*a* – влияние температуры воздуха во впускном трубопроводе дизеля с непосредственным впрыскиванием; *б* – влияние температуры воздуха во впускном трубопроводе у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25%); *в* – влияние давления наддува (избыточного) у дизеля с непосредственным впрыскиванием; *г* – влияние давления наддува (избыточного) у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25%)

**Токсичность и дымность ОГ при работе дизелей.** Токсические характеристики дизелей рассмотрены в условиях работы на установившихся режимах. Однако в условиях эксплуатации тракторов, сельскохозяйственных машин и других транспортных средств дизели работают практически только на неуставившихся режимах. В связи с этим важным является выяснение различия выброса дизелем токсичных веществ на неуставившихся и установившихся режимах работы.

Наибольшая разница концентраций  $NO_x$  на неуставившихся режимах по сравнению с установившимися наблюдается в случае разгона дизеля от режима холостого хода. Концентрации  $NO_x$  при разгоне дизеля всегда ниже, чем в случае его работы на установившихся режимах. При разгоне от средних нагрузок концентрации  $NO_x$  близка к значениям концентраций на установившихся режимах. При разгоне дизеля после кратковременной работы на холостых ходах в случае предыдущей его работы на максимальных нагрузках эти же концентрации практически не отличаются от их значений при установившихся режимах работы дизеля. Тенденция изменения концентраций  $NO_x$  при разгоне до частичных нагрузок также всегда ниже, чем при установившихся режимах. Противоположным по сравнению с  $NO_x$  является изменение концентраций  $CH_x$  в случае работы дизеля на неуставившихся режимах. При разгоне концентрации  $CH_x$  практически всегда больше, чем при установившихся режимах. При разгоне от режима холостого хода эта разница наибольшая.

Концентрация  $CH_x$  при неуставившихся и установившихся режимах зависит от частоты вращения коленчатого вала и резко уменьшается при ее увеличении.

В случае разгона до полной нагрузки концентрации  $CO$  ниже, чем при установившихся режимах. При малых изменениях нагрузок эта разница небольшая. Эта разница так же, как в случае выделения  $CH_x$ , сильно зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя и при повышенном ее значении находится в пределах точности измерения. При разгоне до частичных нагрузок концентрации  $CO$  выше, чем на установившихся режимах. В целом различие концентраций  $CO$  при неуставившихся и установившихся режимах меньше, чем это наблюдается для концентрации  $NO_x$  и  $CH_x$ .

При работе дизеля на установившихся и неуставившихся режимах концентрации  $NO_x$ ,  $CH_x$  и  $CO$  различны. Это различие объясняется в основном изменением температуры стенок КС, которая, например, в случае разгона дизеля, ниже, чем при его работе на неуставившемся режиме.

**Камера сгорания.** Один из определяющих факторов совершенствования рабочего процесса – организация условий впрыскивания топлива и подвода воздуха в цилиндры дизеля, в значительной мере обусловленных типом формы камеры сгорания [17].

Анализ конструкций КС дизелей за последнее время показывает,

что единой тенденции в их развитии нет, хотя наибольшее развитие получили различные модификации дизелей с камерами в поршне. Вместе с тем все большее внимание привлекают разработки особых, нестандартных форм КС, приводящих к улучшению процессов смесеобразования и сгорания в основной период процесса сгорания. С помощью КС в поршне в общем виде реализуется объемно-пленочный тип смесеобразования. В них различными средствами решаются вопросы обеспечения мягкого и экономичного процесса сгорания. Камеры в поршне встречаются открытого и полукрытого типов, хотя на практике большинство вариантов относятся к промежуточным. В открытых камерах их поперечное сечение наибольшей площадью соприкасается с надпоршневым пространством и по размеру близко к площади поперечного сечения поршня. Образование смеси в них происходит в воздушном объеме, заключенном в камере. Тем не менее в них часть топлива попадает в виде пленки или капельной структуры на стенки КС.

В получивших наибольшее распространение камерах полукрытого типа применяются многодырчатые распылители, при впрыскивании топлива из которых факелы распыленного топлива взаимодействуют с перемещающимся в КС воздушным зарядом. В этих камерах основной формой движения воздушного заряда является тангенциальный вихрь, интенсивность которого на расстояниях нескольких миллиметров от стенки КС составляет 20...40 м/с и выше. Наряду с тангенциальным вихрем вследствие вытеснения воздуха при движении поршня возникают и радиальные вихри, как правило, менее интенсивные по сравнению с тангенциальными.

Наиболее эффективно в этих КС рабочий процесс реализуется при охвате факелом топлива всего свободного пространства КС к моменту начала воспламенения при котором взаимодействие топлива с потоком воздуха происходит по максимальной поверхности. При этом унос продуктов сгорания из зоны реакции и исключение возврата продуктов сгорания в зону соседнего факела достигаются за счет сочетания числа сопловых отверстий и скорости тангенциального вихря.

По данным НАТИ, форма днища КС (плоская, с выступом или полусферическая) не оказывает заметного влияния на протекание процессов смесеобразования и сгорания при неизменности других факторов, формирующих рабочий процесс дизеля (процесс подачи топлива, интенсивность вихря в КС, степень сжатия, скоростной режим, диаметр КС, тепловой режим и др.). Тем не менее на практике в отечественных конструкциях чаще используются тороидальные камеры с коническим выступом в центре.

На рисунке 11 представлены наиболее распространенные конструкции головок цилиндров дизелей с открытой КС.

Дизели с открытыми КС имеют высокие эффективные показатели, низкий расход топлива, просты конструктивно. Рабочий процесс в этих дизелях отличается высоким уровнем температур и давлений,

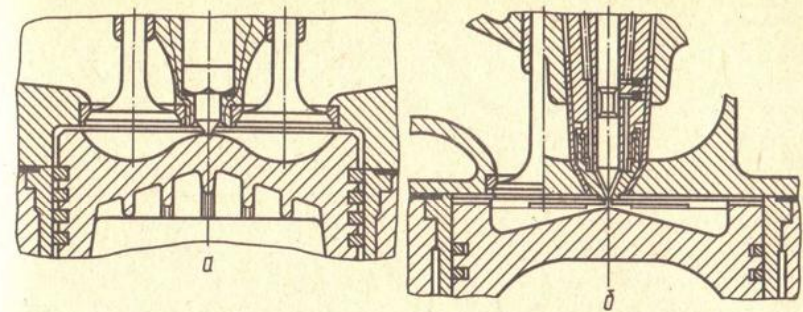


Рис. 11. Камеры сгорания дизелей открытого типа:

*а* – типа Гессельман; *б* – типа Гессельман фирмы "Камминс"

что способствует образованию  $\text{NO}_x$  и одновременно снижению содержания в отработавших газах  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$ . У дизелей с открытой КС наблюдается повышенное дымление, особенно при работе по внешней характеристике. К недостаткам таких камер следует отнести и относительно высокие скорости нарастания давления ( $dp/d\varphi \approx 1,0...1,3$  МПа/град), и максимальные давления цикла (в дизелях без наддува  $p_2$  достигает 9...12 МПа), что связано с наличием большого количества топлива, находящегося в КС в испаренном и распыленном виде еще в период начала горения. Варианты открытых КС (типа Гессельман) даны на рисунке 12, *а* [17]. В варианте 1 представлена традиционная КС типа Гессельман, в варианте 2 – КС с увеличенным диаметром горловины и приподнятым центральным выступом, в варианте 3 – КС с увеличенным зазором над поршнем. Влияние указанных форм КС на экономичность дизеля и дымность ОГ показано на рисунке 12, *б*.

Форма КС типа Гессельман подобрана таким образом, чтобы форма топливной струи в полете обеспечивала равномерное распределение топлива и воздуха в конце впрыскивания, когда основная часть топлива сосредоточивается во фронте топливной струи, а при попадании топлива на стенку КС – в пристеночной зоне, чем обеспечивается высокая экономичность и малая дымность ОГ.

В открытой КС часть топлива попадает на относительно холодные поверхности вырезов под клапаны. Увеличение доли топлива, попадающей на эти поверхности при высоком расположении топливных струй (в варианте 2 угол наклона распыливающих отверстий распылителей равен  $150^\circ$  вместо  $140^\circ$  у традиционной формы КС в варианте 1), ухудшает показатели экономичности и дымности ОГ. В свою очередь, попадание большей части топлива в пристеночную область гильзы цилиндра, в которую отжимается и большая часть воздушного заряда, способствует снижению дымности ОГ – вариант 3 на рисунке 12, *б*. В общем

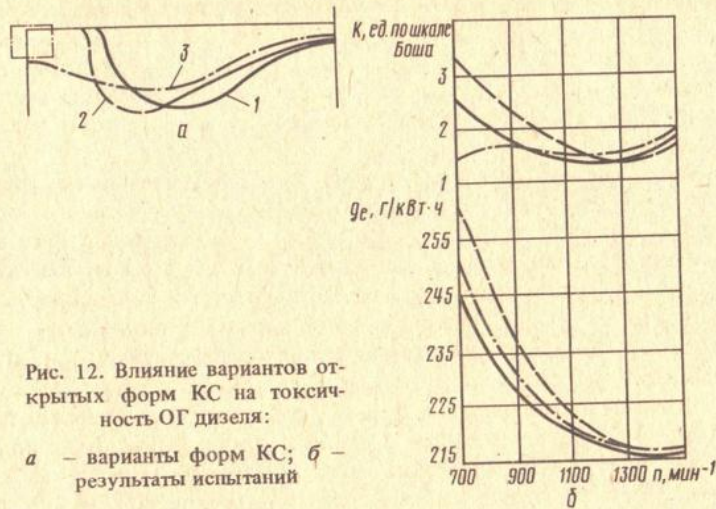


Рис. 12. Влияние вариантов открытых форм КС на токсичность ОГ дизеля:

*a* — варианты форм КС; *б* — результаты испытаний

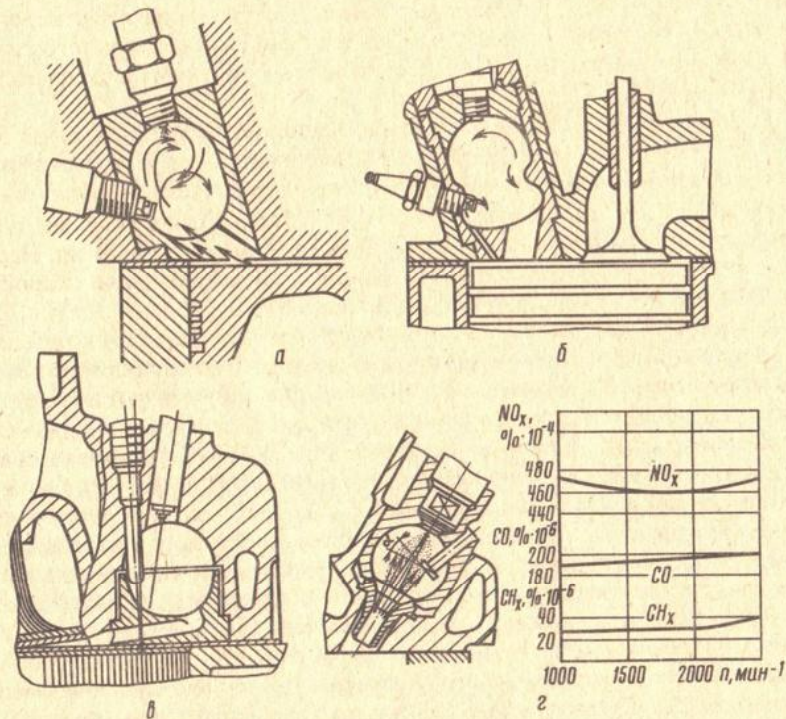


Рис. 13. Предкамеры дизелей:

*a* и *б* — "Тюта"; *в* — "Дженерал Моторс"; *г* — "Манхайм" с показателями токсичности

случае для получения лучших результатов по токсичности, дымности ОГ и экономичности процесса форма КС должна учитывать геометрические параметры топливной струи, ее структуру, организацию вихревого движения в КС, а также возможность попадания топлива не только на стенки КС, но и на более холодные поверхности, в частности — вырезы под клапаны.

Разделенные КС (рис. 13) применяют в предкамерных дизелях. Топливо в этих камерах впрыскивается в предкамеру, где оно воспламеняется и начинает сгорать при недостатке кислорода. Процесс смесеобразования осуществляется за счет кинетической энергии воздуха при его поступлении в предкамеру во время такта сжатия и при перетекании сгорающей смеси из предкамеры в основную КС. Кинетическая энергия струи топлива при истечении из сопла распылителя влияет на процесс смесеобразования в гораздо меньшей степени, чем в открытой КС. При специально организованном вихревом движении воздушного заряда в предкамере и тангенциальном подводе его в основную КС с большой скоростью (100...200 м/с) дизель принято характеризовать как вихрекамерный. У него относительный объем вихревой КС, как правило, равен  $V_{КС}/V_C = 0,4...0,6$ , площадь сечения соединительных отверстий составляет 0,8...2,7 % площади поршня, форсунки закрытого типа с штифтовым распылителем и с относительно низким давлением затяжки иглы.

Высокое использование кислорода позволяет достигнуть  $\alpha = 1,15...1,25$  на номинальном режиме при более низких, чем у других типов КС, токсичности и дымности ОГ. У разделенных КС, как правило, относительный объем предкамеры  $V_{КС}/V_C = 0,25...0,4$ , относительная площадь соединительных каналов равна 0,3...0,6 % площади поршня. Перетекание смеси из предкамеры в основную происходит при скорости 230...320 м/с за 15...20° до прихода поршня в ВМТ.

Наибольшее распространение разделенные КС нашли на дизелях малой размерности. Дизели с непосредственным впрыскиванием топлива с открытой КС имеют на 5...10 % лучшую экономичность по сравнению с дизелями с разделенными КС, однако токсичность и дымность ОГ последних в 2...3 раза ниже. Худшая экономичность вызвана увеличенными насосными потерями при перетекании смеси из предкамеры в основную КС. Меньшее содержание в ОГ оксидов азота в дизелях с разделенной КС связано с дефицитом свободного кислорода на первой стадии сгорания при положении поршня около ВМТ, когда имеются наилучшие условия для образования  $NO_x$ , а малые концентрации  $CO$ ,  $CH_x$ ,  $HCNO$  и  $C$  связаны с ускорением реакций окисления частичек топлива при высокой скорости протекания смеси из предкамеры в основную КС и повышенной турбулизацией топливоздушной смеси в основной КС. Сравнительные данные по токсичности и дымности ОГ дизелей с непосредственным впрыскиванием и с разделенными КС представлены на рисунке 8, *a* [17].

В полуразделенных КС, получивших наибольшее распространение на автотракторных и комбайновых дизелях, реализуются параметры, значения которых занимают промежуточное положение между соответствующими значениями параметров открытых и разделенных КС.

## 5. 2. ПАРАМЕТРЫ И РЕГУЛИРОВКИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

Решающее влияние на образование всех групп токсичных веществ оказывает процесс сгорания углеводородных топлив в цилиндрах, который задается типом и особенностями рабочего процесса, а также работой топливной аппаратуры. Параметры и регулировки последней существенно сказываются на выбросе токсичных веществ дизелем.

Основные факторы, позволяющие снизить токсичность ОГ:

- количество впрыскиваемого топлива;
- длительность впрыскивания (или его скорость);
- давление впрыскивания;
- турбулизация заряда;
- конструктивные особенности;
- угол опережения начала впрыскивания топлива.

**Количество впрыскиваемого топлива.** Уменьшение количества впрыскиваемого топлива (т. е. его цикловой подачи) приводит к увеличению  $\alpha$ , что увеличивает полноту сгорания топлива и снижает выброс дизелем сажи, СО и  $\text{CH}_x$ ; выбросы  $\text{NO}_x$  при этом практически не изменяются, а в некоторых случаях могут даже увеличиваться.

Уменьшение максимальной цикловой подачи лишь частично снижает токсичность ОГ, приводит к падению номинальной мощности дизеля, уменьшая тем самым производительность машины. Поэтому такой метод малоэффективен и может найти применение только в комплексных системах, включающих методы снижения в ОГ оксидов азота.

Для снижения выбросов сажи на режиме полной нагрузки, которой в основном и определяется общий весовой выброс сажи, ориентировочно можно рекомендовать уменьшение максимальной цикловой подачи до 20...25%. Известна обобщенная зависимость, позволяющая обоснованно подойти к выбору практических рекомендаций [18].

Испытания дизелей показали, что характер протекания нагрузочных характеристик в зависимости от  $\alpha$  в первом приближении идентичен для двигателей всех типов и не зависит от способа изменения  $\alpha$ . Однако в зависимости от совершенства рабочего процесса, технического состояния двигателя и состава топлива абсолютные значения концентрации сажи при одном и том же значении  $\alpha$  для различных двигателей отличаются весьма существенно. Учитывая отмеченную закономерность, в качестве обобщающего параметра выбран относительный коэффициент избытка воздуха  $\alpha/\alpha_{0,4}$ , равный отношению текущего коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  коэффициенту избытка воздуха, соответст-

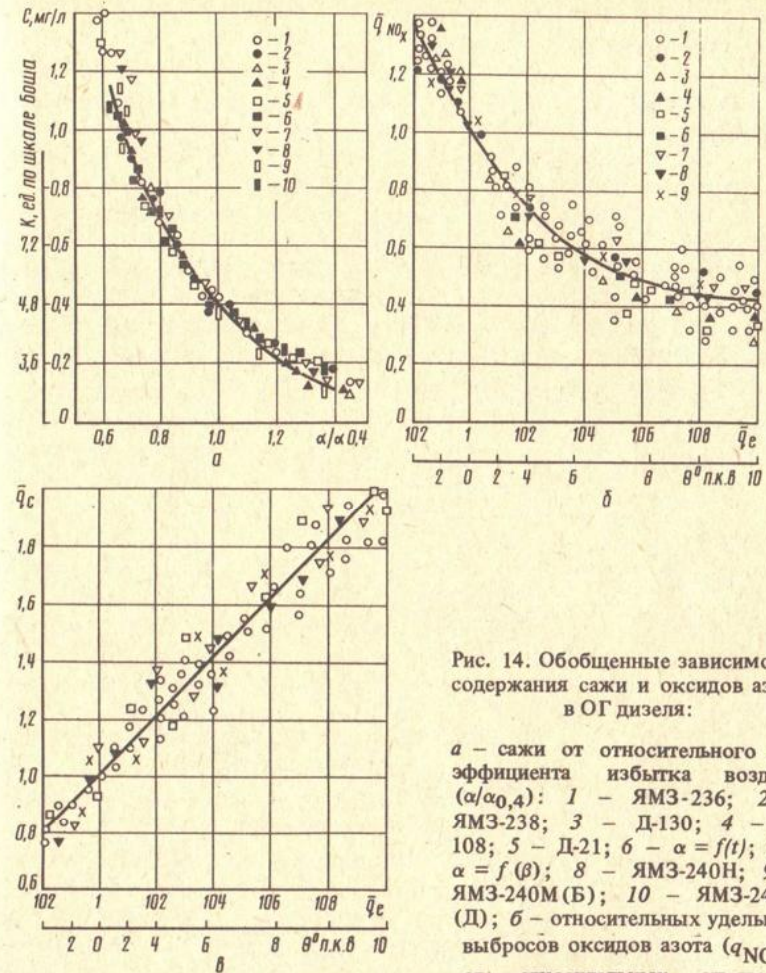


Рис. 14. Обобщенные зависимости содержания сажи и оксидов азота в ОГ дизеля:

$a$  – сажи от относительного коэффициента избытка воздуха ( $\alpha/\alpha_{0,4}$ ): 1 – ЯМЗ-236; 2 – ЯМЗ-238; 3 – Д-130; 4 – Д-108; 5 – Д-21; 6 –  $\alpha = f(t)$ ; 7 –  $\alpha = f(\beta)$ ; 8 – ЯМЗ-240Н; 9 – ЯМЗ-240М (Б); 10 – ЯМЗ-240М (Д);  $b$  – относительных удельных выбросов оксидов азота ( $q_{NO_x}$ ) от относительных удельных

расходов топлива при изменении  $\theta$ : 1 – ЯМЗ-236; 2 – ЯМЗ-238; 3 – 1413/14 л; 4 – 1413/14 ц; 5 – Д-130; 6 – М/4; 7 – Д-108; 8 – СМД-14; 9 – Д-21;  $e$  – относительных удельных расходов выбросов сажи ( $q_s$ ) от относительных удельных расходов топлива при изменении  $\theta$  (обозначения – по позиции  $b$ )

вующего содержанию сажи в ОГ данного дизеля (равного 0,4 мг/л – 5,2 ед. по шкале Боша).

Выбор этого параметра объясняется стремлением построить безразмерный комплекс, который в минимальной степени зависел бы от факторов, приводящих к расхождению измеренных при одном и том же коэффициенте  $\alpha$  абсолютных значений концентраций сажи.

Обобщенный график изменения содержания сажи в зависимости от  $\alpha/\alpha_{0,4}$  приведен на рисунке 14, а [18]. Зависимость в диапазоне изменения концентраций сажи от 0,1 мг/л  $< C < 1,2$  мг/л с достаточной для практических целей точностью описывается эмпирической формулой:

$$C = 1,2 \frac{\alpha_{0,4}}{\alpha} - 0,75, \text{ или для } \frac{\alpha}{\alpha_{0,4}} \text{ в виде } \frac{\alpha}{\alpha_{0,4}} = \frac{1,2}{C + 0,75}. \quad (24)$$

**Угол опережения начала впрыскивания топлива.** Влияние установочного угла опережения начала впрыскивания топлива дизеля Д-240 на концентрацию в ОГ  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$  и удельный расход топлива в зависимости от среднего эффективного давления для заданного скоростного режима работы двигателя представлены на рисунке 15.

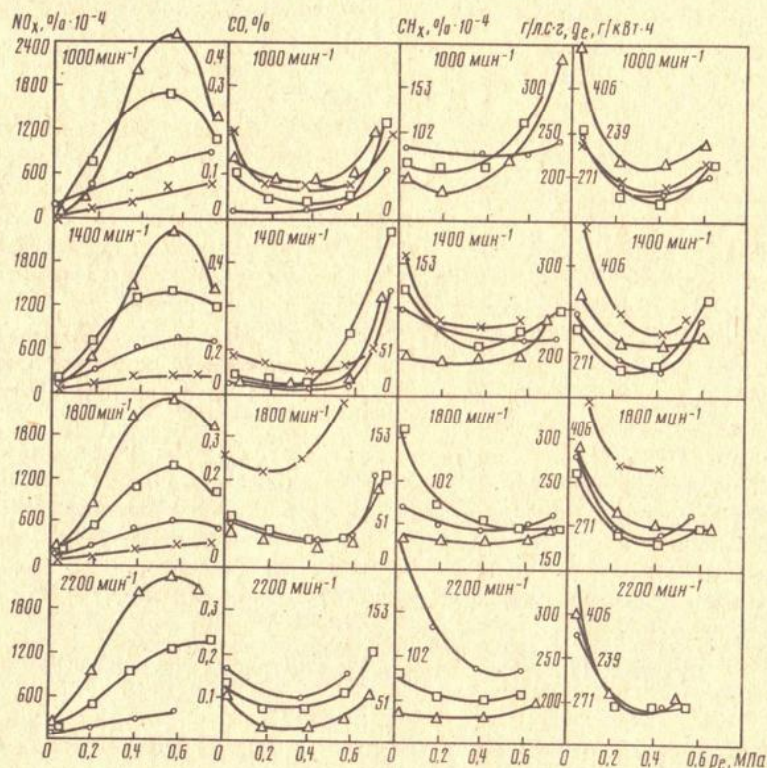


Рис. 15. Влияние установочного угла опережения начала впрыскивания топлива на токсичность ОГ и экономичность дизеля Д-240:

$\Delta$  – 30 град п.к.в. до ВМТ;  $\square$  – 26 град п.к.в. до ВМТ;  $\circ$  – 18 град п.к.в. до ВМТ;  $\times$  – 9 град п.к.в. до ВМТ

Как следует из приведенных данных, содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля Д-240 возрастает с увеличением  $\theta$  во всем диапазоне исследованных скоростных режимов.

Зависимость содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ от среднего эффективного давления имеет более сложный характер. Для больших значений  $\theta$  соответствующие кривые имеют ясно выраженный максимум. Для угла опережения начала впрыскивания топлива 30 град п.к.в. положение абсциссы максимума кривой соответствует примерно постоянному для всех исследованных скоростных режимов значению среднего эффективного давления, равному 0,53..0,56 МПа. Для номинального  $\theta = 26$  град п.к.в. абсцисса максимума возрастает с ростом частоты вращения коленчатого вала.

При меньших установочных  $\theta$  кривые содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ не имеют максимума вообще и могут быть с достаточной степенью точности аппроксимированы параболой второго порядка. Необходимо отметить, что кривые, соответствующие 30 и 26 град п.к.в., имеют явно выраженный перегиб в области  $0,15 < p_e < 0,3$  МПа.

При увеличении  $\theta$  от 26 до 30 град п.к.в. максимальное содержание  $\text{NO}_x$  увеличивается до  $(2,4...2,5) \cdot 10^{-3} \%$ , при максимальной нагрузке – до  $(1,5...2,1) \cdot 10^{-3} \%$ , а на холостом ходу имеет тот же порядок значений, что и при установочном угле 26 град п.к.в. При уменьшении этого угла до 18 град п.к.в. наибольшее содержание  $\text{NO}_x$ , равное  $0,9 \cdot 10^{-3} \%$ , достигается при максимальной нагрузке и минимальной частоте вращения коленчатого вала дизеля Д-240. При увеличении частоты вращения содержания  $\text{NO}_x$  падает и составляет при полной нагрузке  $0,7 \cdot 10^{-3} \%$  для 1400  $\text{мин}^{-1}$ ;  $0,6 \cdot 10^{-3} \%$  для 1800  $\text{мин}^{-1}$ ;  $0,5 \cdot 10^{-3} \%$  для 2200  $\text{мин}^{-1}$ . Дальнейшее снижение  $\theta$  до 9 град п.к.в. снижает содержание  $\text{NO}_x$  примерно в 2 раза по сравнению с углом в 18 град п.к.в.

График зависимости содержания  $\text{CH}_x$  от нагрузки имеет вид выгнутой параболы. Для низких частот вращения (до 1000  $\text{мин}^{-1}$ ) наблюдается тенденция более интенсивного возрастания концентрации  $\text{CH}_x$  в области повышенных нагрузок; в то время как для средних и высоких частот вращения содержание их интенсивнее растет в области малых нагрузок. Зависимость содержания  $\text{CH}_x$  от  $\theta$  имеет достаточно сложный характер, причем наблюдается явная взаимосвязь между влиянием частоты вращения коленчатого вала и установочного угла. На максимальном скоростном режиме уменьшение установочного угла приводит к существенному росту содержания  $\text{CH}_x$  в ОГ двигателя Д-240. В целом можно отметить закономерность увеличения содержания  $\text{CH}_x$  с уменьшением  $\theta$ .

Итак, уменьшение  $\theta$  приводит к значительному уменьшению выброса дизелем Д-240 окислов азота, увеличению выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и некоторому ухудшению его экономических показателей. Таким образом, разработать практические рекомендации на изменение стандарт-



ных регулировок угла опережения начала впрыскивания топлива можно только на основании всестороннего анализа полученных результатов.

Обобщенные зависимости между показателями токсичности ОГ и экономичностью дизелей, не зависящие от индивидуальных показателей дизелей и других неучтенных факторов, приведены на рисунке 14, б, в.

Полученное поле экспериментальных точек, представленное на рисунке 14, позволяет утверждать о наличии явно выраженных корреляционных связей между относительной экономичностью двигателей, относительными удельными выбросами  $\text{NO}_x$  и сажи и изменением угла опережения начала впрыскивания топлива. Необходимо отметить, что полученные зависимости справедливы для любого режима работы двигателей и их использование дает необходимую оценку вне зависимости от того, какой вид имеет ездовой цикл трактора.

Используя их, можно сделать заключение о том, что для сохранения приемлемого уровня экономических показателей дизелей, недопущения чрезмерного увеличения дымления дизеля, а также увеличения выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  из-за серьезных нарушений в процессе сгорания необходимо уменьшить  $\theta$  на 6...10 град п. к. в. Из приведенных данных (см. рис. 14) следует, что эксплуатационные расходы топлива при этом возрастают на  $6 \pm 3\%$ , выброс  $\text{NO}_x$  уменьшается примерно в 2 раза, а выброс сажи увеличивается в 1,3...1,9 раза.

**Параметры процесса впрыскивания.** Существенное влияние на процессы смесеобразования и сгорания, а следовательно, и на топливную экономичность дизеля и условия образования токсичных компонентов оказывает качество процесса топливоподачи. Воздействие на этот процесс путем рационального подбора геометрических характеристик топливной аппаратуры, условий и параметров впрыскивания топлива позволяет одновременно достигнуть улучшения экономичности рабочего процесса и снижения выброса продуктов неполного сгорания топлива ( $\text{C}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{RCHO}$  и др.). В результате дополнительных мероприятий появляется возможность снижения выброса с ОГ и  $\text{NO}_x$ .

Впрыскивание топлива в КС начинается за 10...25 град п. к. в. до ВМТ и в зависимости от режима работы двигателя продолжается от 7 до 25 град п. к. в. Топливо впрыскивается в КС через одно или несколько (в зависимости от типа дизеля 3...6-сопловых отверстий распылителя диаметром от 0,2 до 0,36 мм).

В момент впрыскивания давление среды составляет до 3...7 МПа при температуре до 800...1000 К. В объеме КС топливо распадается на капли, диаметр которых составляет 3...60 мкм. Распад топлива на капли зависит от трения топлива о стенки сопловых каналов, вязкости топлива, параметров топливоподачи (в первую очередь от турбулентности его движения в сопловом канале).

При умеренных скоростях истечения топлива через сопловые ка-

налы, определяемые давлением топлива в форсунке (для большинства отечественных автотракторных дизелей  $p_{\text{впр}} = 15...35$  МПа), распад топливной струи происходит под действием продольных возмущений, сил поверхностного натяжения и силы аэродинамического сопротивления воздуха.

Опыт зарубежных специалистов доказывает, что в последние годы наметилась тенденция резкого увеличения давления впрыскивания (вплоть до 150...200 МПа), при котором распад струи топлива начинается непосредственно у самого соплового канала, что качественно изменяет протекание процессов смесеобразования и сгорания.

Исследованиями на одноцилиндровой установке фирмы "Даймлер-Бенц" ( $V_h = 1,6$  л,  $D/S = 12/14$ ,  $n = 2300$  мин<sup>-1</sup>,  $\epsilon = 19,5$ ) с применением методов лазерной диагностики установлены следующие особенности влияния увеличения энергии впрыскивания топлива на показатели рабочего процесса дизеля [68]. Серийная система впрыскивания включала в себя топливный насос фирмы "Бош" PESIPM с плунжером диаметром 10 мм, ходом 2,8 мм, максимальной цикловой подачей в 150 мм<sup>3</sup> за цикл, длиной трубопровода высокого давления 925 мм при диаметре 2 мм; форсунки DLLA 150S/86 с четырьмя сопловыми отверстиями при натяжке пружины иглы форсунки 17,5 МПа.

Экспериментальная система с увеличенной энергией впрыскивания топлива включала топливный насос PE6ZWM 140 той же фирмы с плунжером диаметром 15 мм, ходом 1,5 мм, длиной трубопровода высокого давления 1180 мм при диаметре 1,6 мм; форсунки DLLA 145 PV с четырьмя сопловыми отверстиями и усилием натяжки пружины иглы форсунки 50 МПа. Увеличение давления впрыскивания топлива с 22 до 67 МПа привело к увеличению скорости распространения струи топлива в КС примерно вдвое, а угол раскрытия струи уменьшился (рис. 16). Для случая увеличенной энергии впрыскивания испарение топлива начинается намного быстрее, и прежде всего во фронте струи, который раньше достигает противоположной стенки камеры сгорания (см. рис. 16, б). Кинорегистрация процессов смесеобразования и сгорания позволила установить, что при впрыскивании в КС с вихревым движением воздушного заряда процесс смесеобразования начинается примерно в один и тот же момент времени. Однако при увеличенной энергии впрыскивания сгорание протекает более интенсивно по всему объему в передней части фронта струи, в то время как при традиционном впрыскивании оно идет более вяло и начинается сбоку струи. Увеличенная скорость струи топлива, резкое уменьшение объема ее жидкой фазы и большая однородность струи косвенно свидетельствуют о снижении диаметра капель при распаде струи, высокой однородности заряда при интенсификации процесса впрыскивания топлива. Белое пламя при интенсивном впрыскивании гаснет через 22 град п. к. в., в то время как при традиционном впрыскивании — только через 77 град п. к. в., т. е.

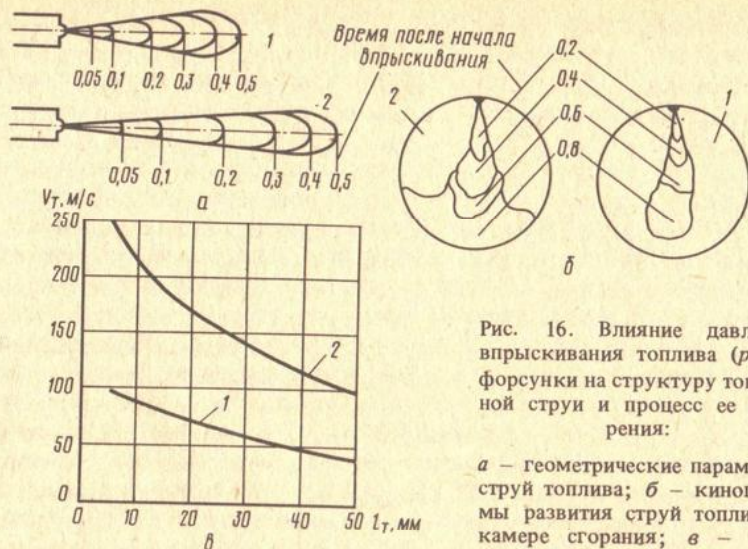


Рис. 16. Влияние давления впрыскивания топлива ( $p_{впр}$ ) форсунки на структуру топливной струи и процесс ее испарения:

$a$  – геометрические параметры струй топлива;  $b$  – кинограммы развития струй топлива в камере сгорания;  $v$  – зависимость изменения длины топливной струи от ее скорости  $V_T$ . Условия эксперимента: угол опережения начала впрыскивания топлива 13 град п.к.в. до ВМТ, цикловая подача  $20 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ , продолжительность впрыскивания – 10 град п.к.в.,  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ , вихревое движение отсутствует; 1 –  $p_{впр} = 22 \text{ МПа}$ ; 2 –  $p_{впр} = 67 \text{ МПа}$

продолжительность сгорания топлива при интенсификации его впрыскивания резко сокращается.

При проведении стендовых испытаний на одноцилиндровом двигателе с  $V_h = 1,8 \text{ л}$ ,  $D/S = 12,8/14$ ;  $\epsilon = 17,4$  было установлено, что период задержки воспламенения практически не зависит от давления впрыскивания, величина максимального давления цикла при высоких нагрузках снижается, однако жесткость процесса ( $dp/d\phi$ ), а следовательно, и уровень шума заметно увеличиваются, что вызывает необходимость снижения установочного угла опережения впрыскивания топлива. С точки зрения токсичности и дымности ОГ повышение энергии впрыскивания топлива при обеспечении условий сохранения угла опережения и продолжительности впрыскивания приводит к резкому снижению дымности ОГ на всех режимах работы двигателя и содержания углеводородов при работе на малых и высоких нагрузках при низкой частоте вращения коленчатого вала и на высоких нагрузках при увеличении частоты вращения до номинальной. При этом содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ, экономические показатели двигателя при указанных условиях эксперимента практически не изменились.

Более значимые результаты по токсичности и дымности ОГ, а также по индикаторному расходу топлива получены ЦНИТА [19] при

проведении аналогичных исследований на одноцилиндровой установке 14 13/14, но при оптимальной установке угла опережения начала впрыскивания топлива его величина уменьшилась (рис. 17), что способствовало наряду со снижением выброса с ОГ, С,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  уменьшению выброса  $\text{NO}_x$  (см. рис. 17,  $a$ ) и уменьшению удельного расхода топлива до  $5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  (рис. 17,  $b$ ).

В исследованном диапазоне давления впрыскивания  $30\text{--}72 \text{ МПа}$  не определено предельных оптимальных значений  $p_{впр}$  по параметрам токсичности и дымности ОГ и экономичности рабочего процесса.

**Турбулизация заряда.** Турбулентность, создаваемая в процессе сжатия (и особенно сгорания), приводит к повышению эффективности сгорания, увеличивая при этом использование кислорода. Создание турбулентного движения воздушного заряда в процессе впуска обеспечивается зашпирмлием впускных клапанов, установкой во впускных патрубках вставок спиральной формы, дросселированием потока клапанами с переменным объемом. Организация турбулентного движения в КС достигается применением вихревых камер и предкамер.

**Конструктивные особенности.** Совершенствование систем топливоподачи идет и по направлению внедрения систем электронного управления. Так, новый насос  $MW$  фирмы "Бош", имеющий компактную кон-

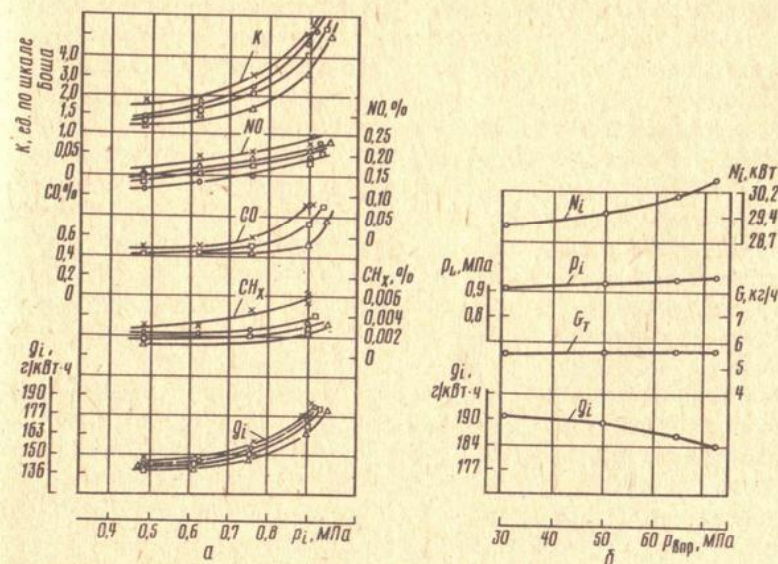


Рис. 17. Влияние интенсивности впрыскивания топлива ( $p_{впр}$ ) на токсичность и дымность ОГ ( $a$ ), а также на индикаторные показатели дизеля ( $b$ ):

$\Delta$  –  $p_{впр.ном} = 72 \text{ МПа}$ ;  $\square$  –  $p_{впр.ном} = 65 \text{ МПа}$ ;  $\circ$  –  $p_{впр.ном} = 50 \text{ МПа}$ ;  $\times$  –  $p_{впр.ном} = 30 \text{ МПа}$ ;  $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$

струкцию с литым корпусом всего насоса и коваными корпусами секций, имеет давление подачи до 85 МПа (в классических типах *A* давление подачи до 60 МПа). У нового насоса *R 7100* увеличены до 12 мм диаметр и ход плунжера, его конструкция выдерживает давление до 100 МПа.

Современные конструкции форсунок оснащены штифтовыми и дырчатými распылителями типа *PD*. Давление начала впрыскивания у штифтовых форсунок составляет около 13 МПа. В современных форсунках давление впрыскивания регулируется: фирмой "Ford" (США) — на 25...29 МПа, фирмой "Fendt" (ФРГ) — на 22 МПа, фирмой "Lamborg hini" (Италия) — на 18...23 МПа, фирмой "Renault" (Франция) — на 17...19 МПа.

При ужесточении требований к токсичности и дымности ОГ, а также расходу топлива возрастает число контролируемых параметров дизеля и усложняются системы регулирования. По этой причине большинство зарубежных фирм приступило к разработке и уже серийно изготавливает системы электронного управления работой дизелей, которые, кроме функций контроля токсичности и дымности ОГ, улучшения топливной экономичности, выполняют функции диагностики, обеспечения надежности пуска, защиты систем охлаждения и смазывания и т. п. Так, фирма "Diesel Kiki" разработала ТНВД распределительного типа с электронным управлением второго поколения. В этом насосе цикловая подача топлива и угол опережения впрыскивания топлива регулируются в зависимости от положения тумблеров включения стартера, температуры охлаждающей жидкости, расхода воздуха на впуске, нагрузки и др. по программе микропроцессора в зависимости от режимов работы двигателя. Электронная система осуществляет контроль работы системы топливоподачи по каждому цилиндру отдельно, обеспечивает регулирование дизеля при двойной топливоподаче и при конвертации его для работы на альтернативных видах топлива. Указанный ТНВД применяет и фирма "Isuzu" на базовых дизелях *6RAIT*, что позволяет улучшить токсические показатели, а удельный расход топлива уменьшить до 10 г/кВт·ч.

Фирма "Lucas CAV" разработала специальный топливный насос роторного типа с электронным регулятором, топливная система *EPIC* которого включает блок микропроцессора, датчики положения педали управления, частоты вращения коленчатого вала, положения ВМТ, температур воздуха и охлаждающей воды, давления наддува и датчик подъема иглы форсунки. Система имеет замкнутую обратную связь при контроле подачи топлива и момента впрыскивания. Сигналы от датчиков сравниваются с программой, заложеной в микропроцессор, и при их расхождении исполнительные устройства корректируют подачу и момент впрыскивания топлива. Одним из преимуществ электронного регулятора является строгое обеспечение задаваемой характе-

ристики максимальной цикловой подачи топлива на всех режимах работы дизеля и гибкое регулирование подачи топлива на частичных режимах, что обеспечивает оптимальность регулирования работы двигателя вблизи от предела дымления во всем диапазоне частот вращения.

Система согласуется также с органами управления системы рециркуляции ОГ, обеспечивая тем самым минимальный уровень токсичности ОГ дизеля.

### 5.3. ТОПЛИВО И МАСЛА

**Влияние на токсичность и дымность.** Определенное воздействие на процесс сгорания и образование токсичных веществ оказывает состав топлив, применяемых в дизелях. На смесеобразование влияют следующие свойства топлива: плотность, цетановое число, вязкость, содержание ароматических углеводородов, температура кипения, теплота испарения и др. От молекулярного состава топлива значительно зависят количество воздуха, необходимого для сгорания топлива, протекание предпламенных реакций, скорость сгорания и характеристики самовоспламенения.

Профессор А. С. Соколик считает, что причиной дымления является наличие в КС зон с крайне отличающимися значениями коэффициента избытка воздуха во время распространения фронта пламени после возникновения его начальных очагов. Выделение свободного углерода происходит в тех зонах, где существует значительный дефицит кислорода. Для уменьшения задержки воспламенения топливо должно состоять из углеводородов, обладающих малой термической стойкостью, чему больше всего удовлетворяет стандартное ДТ с плотностью от 0,83 до 0,85 г/см<sup>3</sup> и температурами кипения углеводородов от 160...180 до 360...380 °С. Однако хорошая воспламеняемость ДТ в последующих стадиях горения способствует образованию сажи, которая в дальнейшем в той или иной мере выгорает. При использовании бензина в дизельном процессе поле неоднородных концентраций топлива по объему КС выравнивается быстрее (по сравнению со случаем применения ДТ) и к моменту окончания задержки воспламенения становится более однородным, что приводит к снижению образования сажи.

Процесс горения тяжелых жидких топлив состоит из следующих основных стадий: прогрета и испарения частиц, воспламенения и горения паров топлива с одновременным пиролизом (термической диссоциацией) тяжелых углеводородов в паровой фазе, выгорания свободного углерода и, далее, прогрета и выделения свободного углерода.

Одним из перспективных по влиянию на токсичность может быть эмульсия ДТ с водой. Значительное снижение выброса сажи (до 90 %) достигается за счет применения газообразного топлива. При этом возможна работа дизеля на сжатом и сжиженном газообразном топливе,

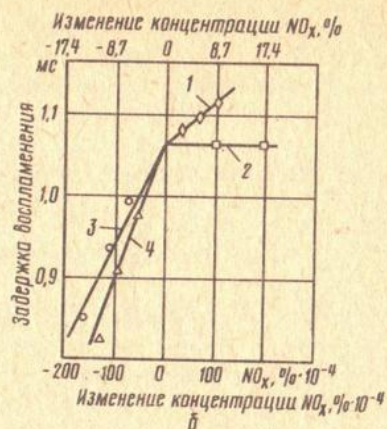


Рис. 18. Влияние топлива на содержание оксидов азота в ОГ дизеля:

*a* — влияние цетанового числа топлива на содержание в ОГ оксидов азота: ———— цетановое число 59; - - - - цетановое число 35; *б* — взаимосвязь между периодом задержки воспламенения и содержанием  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля: 1 — изоамиловый спирт; 2 — нитрометан; 3 — изоамил-нитрат; 4 — пероксид бутила

работа с присадкой газа при подаче его либо в цилиндры, либо во впускные трубопроводы.

Для соответствия топлива всем фазам сгорания дизельного процесса должны быть не товарные жидкие топлива, а смеси различных топлив, в том числе и газообразного. Поэтому подбор топлив и масел может быть важным резервом улучшения как экономических и мощностных, так и токсических характеристик дизелей.

На рисунке 18 представлены данные по влиянию двух топлив (с цетановым числом 35 и 59) на содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ [63]. Для обеспечения начала горения этих топлив в одной точке цикла момент начала впрыскивания топлива с низким цетановым числом задавался более ранним. Топливо с пониженным цетановым числом имеет большую задержку воспламенения, в связи с чем в момент начала горения в зонах бедной смеси находится большее количество топлива, чем достигается высокий уровень температур смеси. По этой причине образуется большее количество  $\text{NO}_x$ .

Топлива с большим цетановым числом являются причиной увеличения дымности ОГ, что объясняется более низкой их стабильностью. За рубежом для увеличения цетанового числа в топливо добавляют азотсодержащие присадки, способствующие снижению выброса карбонильных соединений и  $\text{CO}$  с ОГ. Присадки, уменьшающие задержку воспламенения (изоамил-нитрат, пероксид бутила и др.), снижают содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ а увеличивающие задержку воспламенения, наоборот, увеличивают выброс  $\text{NO}_x$  (изоамиловый спирт, нитрометан и др.).

Одна из важных характеристик ДТ — температура самовоспламенения, значение которой зависит от химического состава топлива. Чем больше в топливе содержится ароматических углеводородов, тем выше его температура самовоспламенения. Наименьшая температура самовоспламенения характерна для парафиновых углеводородов [69, 70].

Фракционный состав топлива также оказывает влияние на токсичность и дымность ОГ дизеля, в первую очередь на концентрацию в ОГ углеводородов. При проведении испытаний на дизеле 6V-71N четырех видов топлив, различающихся по температуре начала перегонки (от 154 до 191 °С), по температуре 10 %-ной перегонки (от 179 до 242 °С) и температуре конца перегонки (от 220 до 338 °С), установлено, что содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ изменялось от 0,9 до  $3 \cdot 10^{-4}$  % при изменении температуры 10 %-ной перегонки от 196 до 242 °С [70]. Облегчение головных фракций топлива также приводит к увеличению выброса углеводородов с ОГ. Так, в результате использования дизельных топлив 1-D и 2-D, а также масла 10 W, температура перегонки которых соответственно увеличивается, установлено, что при применении 1-D содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ составляет в среднем  $72 \cdot 10^{-6}$  %, а при применении масла 10 W —  $22 \cdot 10^{-6}$  %.

Представляют интерес данные исследований по определению влияния интенсификации впрыскивания и состава топлива [стандартное дизельное топливо Л-0,5 (ГОСТ 305-82)] и топлива расширенного фракционного состава (РФС) на показатели рабочего процесса дизеля размером 13/14 со штатным поршнем, степенью сжатия  $\epsilon = 14,5$  и головкой цилиндра с энергией вихря  $E_v = 13$  Н·м/с. Интенсификация впрыскивания осуществлялась за счет увеличения скорости плунжера на рабочем участке профиля кулачка с увеличенной высотой профиля, обеспечивающей ход плунжера  $h = 11$  мм (вместо стандартного  $h = 10$  мм). Результаты испытаний представлены в таблице 15.

Анализируя результаты испытаний на режимах 1...4 при работе дизеля на стандартном топливе при увеличении высоты профиля кулачка от 10 до 11 мм, следует отметить заметное увеличение максимального давления впрыскивания (на 1 град п. к. в. двигателя). Скорость нарастания давления при сгорании ( $dp/d\phi$ ) с увеличением  $h$  на 1 мм понизилась на 3 %. Максимальное давление сгорания снизилось на 8 %. Удельный эффективный расход топлива на режиме, соответствующем  $M_{kmax}$  снизился на 2,7 %, на режиме номинальной мощности остался практически неизменным.

При работе двигателя с ТНВД, ход плунжера в котором 11 мм, отмечено снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на 20 % и  $\text{CH}_x$  — на 50 %. Выбросы окиси углерода не изменились. Дымность заметно возросла.

При работе дизеля на топливе РФС (с высотой профиля кулачка 10 и 11 мм) можно отметить значительное улучшение топливной экономичности дизеля. Заметного влияния топлива РФС на  $p_z$ ,  $dp/d\phi$ ,  $p_{впр}$ , а также токсичность и дымность ОГ не отмечено. Не удалось устано-

15. Влияние топлива РФС

| Тип топлива | Ход плунжера, мм | Частота вращения л, мин <sup>-1</sup> | Крутящий момент $M_K$ , Н·м | Цикловая подача $q_{ц}$ , мм <sup>3</sup> /ц | Давление наддува $P_K$ , кПа | $g_e$ , г/кВт·ч | $P_z$ , МПа |
|-------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|-----------------|-------------|
| Стандартное | 10               | 1300                                  | 120                         | 139  | 134                          | 258             | 8,7         |
| "           | 10               | 1750                                  | 90                          | 99   | 154                          | 249             | 8,25        |
| "           | 11               | 1300                                  | 122                         | 139  | 134                          | 251             | 8,75        |
| "           | 11               | 1750                                  | 90                          | 100  | 154                          | 250             | 7,75        |
| РФС         | 10               | 1300                                  | 122                         | 132  | 134                          | 241             | 8,93        |
| РФС         | 10               | 1750                                  | 90                          | 97   | 154                          | 239             | 8,25        |
| РФС         | 11               | 1300                                  | 122                         | 131  | 134                          | 235             | 8,6         |
| РФС         | 11               | 1750                                  | 90                          | 103  | 154                          | 239             | 7,7         |

вить и однозначного влияния топлива РФС на период задержки воспламенения.

Таким образом, по результатам исследования показателей дизеля при работе на топливе РФС установлено, что по сравнению с серийным топливом топливо РФС не оказывает заметного влияния на максимальное давление сгорания, скорость нарастания давления, максимальное давление впрыскивания, а также на токсичность и дымность ОГ. Вместе с тем следует отметить существенное улучшение топливной экономичности двигателя, особенно при работе с ТНВД с высотой профиля кулачка 11 мм.

**Антидымные присадки.** Одно из эффективных средств снижения дымности ОГ дизелей – применение антидымных присадок, которые добавляют в топливо в количествах, не превышающих 1 % от массы топлива. Присадки могут содержать различные добавки (Pb, Fe, Co, Ni, Cu, Cr, Ba и др.), но наибольшее распространение нашли присадки на базе бария. Известны присадки *SLD* (Бельгия), "Парадайн-12" и *SSA* (США), А-2, ИХП-706 (СССР, Институт химии присадок АН АЗССР) и др.

Согласно проведенным исследованиям присадки достаточно эффективно (в среднем в 2 раза) снижают дымность ОГ дизелей. Механизм действия антидымных присадок детально не выяснен. Считается, что барий, содержащийся в антидымных присадках, подавляет процесс коагуляции частиц углерода, в результате чего образование сажи и дымность ОГ уменьшаются. Бариевые присадки не оказывают заметного влияния на процесс образования сажи, а влияют в основном на процесс ее выгорания за счет интенсификации процессов диффуз-

на показатель дизеля

| $(dp/d\varphi_{max})$<br>МПа/град | Продолжительность впрыскивания $T$ , град п. к. в. | Максимальное давление впрыскивания $P_{впр}$ , МПа | Концентрация в ОГ      |                                      |                                      | Дымность ОГ, ед. по шкале Боша |
|-----------------------------------|--|--|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|                                   |  |  | CO, 10 <sup>-2</sup> % | CH <sub>x</sub> , 10 <sup>-4</sup> % | NO <sub>x</sub> , 10 <sup>-3</sup> % |                                |
| 0,46                              | 21   | 24   | 10                     | 1,8                                  | 2                                    | 3,5                            |
| 0,42                              | 22   | 29   | 3                      | 2                                    | 1,4                                  | 1,0                            |
| 0,445                             | 20   | 28,6   | 13                     | 1                                    | 1,7                                  | 4,7                            |
| 0,365                             | 21   | 32,6   | 0,2                    | 2                                    | 0,9                                  | 3,0                            |
| 0,5                               | 22   | 24,7   | 8                      | 1,7                                  | 2                                    | 4,8                            |
| 0,41                              | 22   | 29   | 5                      | 2                                    | 1,4                                  | 2,5                            |
| 0,47                              | 21   | 27,9   | 7                      | 1,4                                  | 1,7                                  | 4,5                            |
| 0,379                             | 21   | 33,5   | 0,02                   | 1,6                                  | 0,9                                  | 2,8                            |

ного догорания в обогащенных топливом зонах КС, являющихся центрами образования сажевых частиц.

Результаты испытаний антидымных присадок представлены на рисунке 19. Все характеристики снимались с топлива трех видов: ДТ по ГОСТ 305–82 (содержание серы не более 0,2); ДТ по ГОСТ 305–82 с антидымной присадкой ИХП-706 в количестве 0,5 % от массы ДТ; ДТ по ГОСТ 305–82 с антидымной присадкой "Парадайн-12" в количестве 0,5 % от массы топлива. Средняя величина уменьшения дымности дизеля Д-240 составляла для испытанных присадок 50...60 %. При малых частотах вращения коленчатого вала по мере увеличения нагрузки двигателя характерно уменьшение эффективности действия присадок с 70...80 до 20...40 %.

Таким образом, уменьшение действия присадок наблюдается на режимах работы дизелей, сопровождающихся повышенной дымностью ОГ.

Как видно из представленных данных, антидымные присадки "Парадайн-12" и ИХП-706 уменьшают не только дымность ОГ, но и содержание БП, при этом присадка ИХП-706 снижает содержание БП в среднем на 40 %, а "Парадайн-12" – до 30 %. Эффективность присадок по отношению к БП незначительно зависит от режимов работы испытанных дизелей. Содержание NO<sub>x</sub> и СО в ОГ дизеля Д-240 при применении присадок ИХП-706 и "Парадайн-12" практически осталось без изменений.

Применение антидымных присадок не повлияло на экономические и мощностные показатели двигателя Д-240.

## 6. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ

### 6.1. МАЛОТОКСИЧНЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ

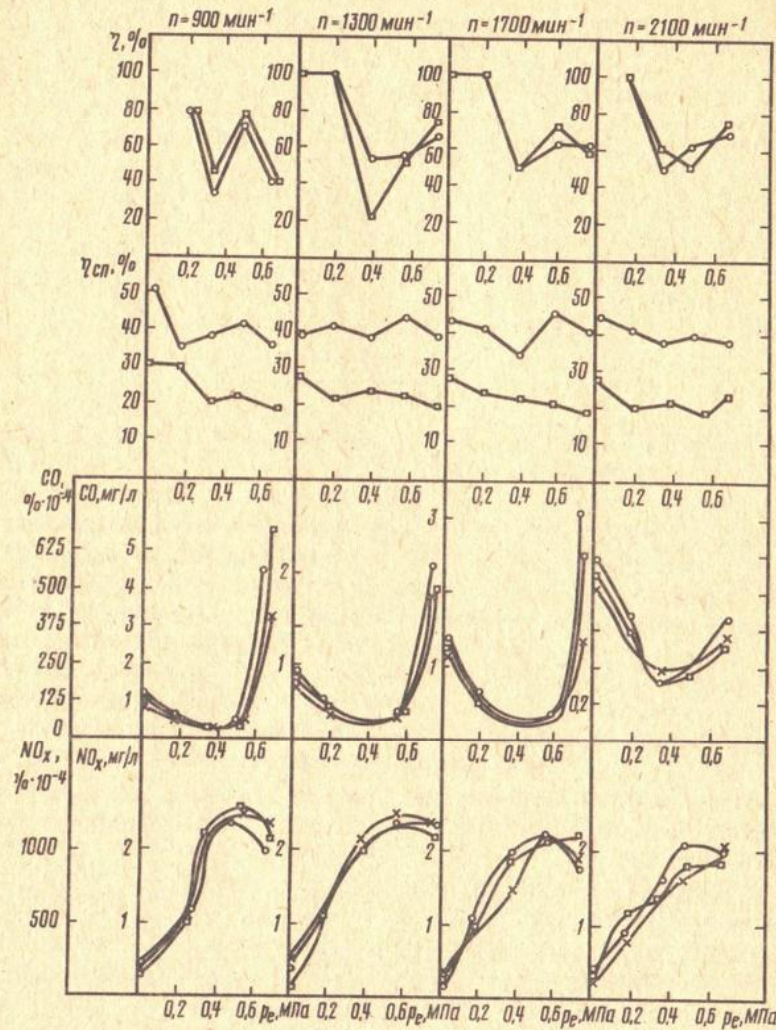


Рис. 19. Влияние антидымных присадок ИХП-706 и "Парадайн-12" на токсичность и дымность ОГ дизеля Д-240:

× — без присадок; ○ — ИХП-706; □ — "Парадайн-12"

Снижение выброса вредных веществ в атмосферу с ОГ дизелей может быть достигнуто за счет использования малотоксичных рабочих процессов. Прежде чем перейти к их рассмотрению, остановимся коротко на возможных методах воздействия на механизм образования основных токсичных компонентов, позволяющих обеспечить минимальный уровень токсичности и дымности ОГ путем соответствующей организации протекания процесса горения топлива. Общие принципы формирования малотоксичного рабочего процесса можно сформулировать следующим образом.

Для снижения образования  $\text{NO}_x$  первая стадия сгорания топлива должна осуществляться при обогащении рабочей смеси в условиях недостатка атомарного кислорода за фронтом пламени, а вторая стадия диффузионного сгорания — при обеднении смеси при интенсивной турбулизации топливовоздушной смеси. Такое протекание рабочего процесса в дизеле тормозит процесс образования  $\text{NO}_x$  из-за дефицита кислорода на первой стадии в условиях высоких температур, а на второй стадии процесс образования прекращается в результате снижения общего температурного уровня смеси. Период задержки воспламенения топлива при этом максимально сокращается. Для снижения содержания  $\text{CO}$  в ОГ необходимо стремиться к интенсификации перемешивания топливовоздушной смеси в конечной фазе догорания топлива.

Снижение содержания в ОГ сажи достигается за счет торможения предпламенных процессов, гомогенизации топливного заряда в объеме КС, сокращения количества топлива, достигающего холодных стенок КС, и турбулизации смеси в период догорания топлива.

Мероприятия, направленные на сокращение периода задержки воспламенения и турбулизации топливовоздушной смеси во второй период диффузионного сгорания, позволяют уменьшить содержание в ОГ углеводородов.

Таким образом, при малотоксичном рабочем процессе в начальный период сгорания необходимо уменьшить интенсивность тепловыделения при условии интенсификации скорости сгорания и турбулизации смеси в конечной фазе сгорания.

Реализация этих положений в наибольшей мере осуществляется в разделенных и вихревых КС при организации двойной (или ступенчатой) топливоподачи, в полуразделенных КС, а также при применении ряда специальных мероприятий.

В дизелях с разделенными КС содержание практически всех основных токсичных компонентов существенно ниже, чем в дизелях с непосредственным впрыскиванием и полуразделенными КС (см. табл. 13).

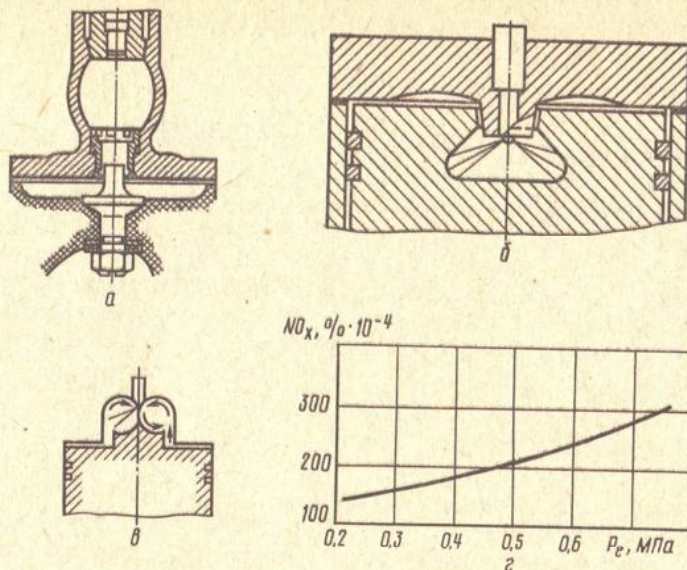


Рис. 20. Схемы КС с переменной геометрией соединительных каналов: а – КС "SEMT-Pielstick"; б – КС по а.с. № 547336; в – КС с выступом на поршне; з – токсичность ОГ по  $NO_x$  КС с выступом на поршне

Общий недостаток малотоксичных дизелей с предкамерным и вихрекамерным смесеобразованием – увеличенный расход топлива, связанный с дополнительными потерями энергии на перетекание смеси из предкамеры в основную КС. Этот недостаток предкамерных дизелей отсутствует в дизеле фирмы "SEMT-Pielstick", предкамера которого имеет соплообразную геометрию соединительного канала (рис. 20, а). Камера сгорания дизелей этой фирмы серии PA4-185 и PA4-200 состоит из предкамеры с объемом около 30 %, в которую впрыскивается топливо. Предкамера соединена с основной КС отверстием, которое запирается коническим выступом в момент подхода поршня к ВМТ. Из предкамеры смесь с высокой скоростью перетекает в основную КС через узкое кольцевое сечение только при положении поршня около ВМТ, а в остальное время газообмен происходит при наличии незначительных перепадов в сопловом отверстии предкамеры без излишних затрат энергии. Реализация предкамерного процесса с малым периодом задержки воспламенения топлива в предкамере в сочетании с небольшими затратами энергии на перетекание смеси позволяет снизить расход топлива до 221 г/кВт·ч, т. е. на уровне дизеля с непосредственным впрыскиванием, при содержании  $NO_x$  в ОГ до  $6 \cdot 10^{-4}$  %, резком сниже-

Рис. 21. Варианты конфигурации конструктивных элементов неразделенной КС фирмы "Perkins"

нии дымности ОГ (не более единицы по шкале Боша) и снижении максимального давления сгорания до 25 % [17].

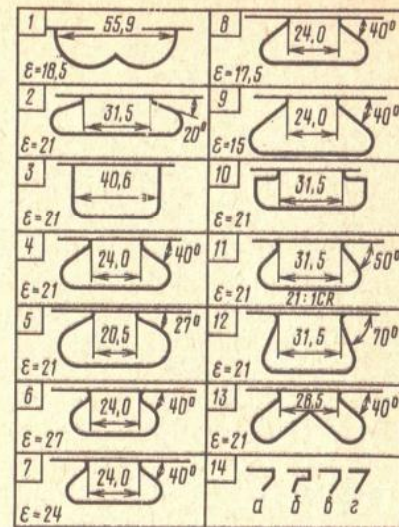
Определенный интерес по аналогии с приведенными результатами представляет камера в поршне по а. с. 547336 СССР (рис. 20, б), а также КС тороидальной формы, расположенная в головке цилиндра (рис. 20, в), нижняя часть которой закрывается специальным завихрителем в днище поршня. В этой КС через пазы в завихрителе воздух из ее центральной части вытесняется на периферию и обратно, чем достигается улучшение смесеобразования топлива с воздухом в условиях недостатка кислорода в тороидальной камере. Такая КС характеризуется очень низкой токсичностью ОГ по  $NO_x$  (рис. 20, з), а также по углеводородам и низкой дымностью ОГ.

Большой интерес в разработке малотоксичных рабочих процессов представляет опыт фирмы "Перкинс". На трехцилиндровом дизеле с рабочим объемом 2,52 л исследована большая группа форм КС при вариации степени сжатия от 15 до 27 и частоты вращения от 1400 до 2600  $min^{-1}$  (рис. 21).

По сравнению со стандартной открытой КС (вариант 1) в КС с зауженной горловиной (вариант 2) улучшена топливная экономичность процесса,  $p_z$  уменьшена с 10,9 до 7,24 МПа,  $T_z$  снижена с 1887 до 1527 К при снижении дымности ОГ с 5...6 до 2,5...4,5 единицы по шкале дымомера Боша.

Уменьшение диаметра горловины КС до 20 мм позволило уменьшить дымность ОГ на 2...3 единицы по шкале Боша, концентрацию  $NO_x$  в ОГ на  $(4...8) \cdot 10^{-4}$  % при учете изменения угла опережения впрыскивания топлива (варианты 2...5). Наибольший эффект снижения  $NO_x$  достигнут в варианте 5 – на 0,001 %. Наилучшие данные по  $g_e$  получены при диаметре горловины 32...37 мм и угле опережения начала впрыскивания топлива 4...6 град п. к. в. до ВМТ.

Увеличение степени сжатия с 15 до 27 позволило снизить задержку воспламенения более чем в 3 раза, а содержание  $NO_x$  в ОГ уменьшилось на  $(0,4...14) \cdot 10^{-4}$  % при значениях  $\theta = 12$  и 0 град п. к. в. до ВМТ соответственно. Однако для этих вариантов (6, 7, 4, 8 и 9) ухудшилась топливная экономичность и дымность ОГ.



В результате исследования влияния угла наклона боковой поверхности относительно днища поршня (варианты 10, 2, 11, 12) при углах опережения впрыскивания топлива в 12, 8, 4 и 0 град п. к. в. до ВМТ найдены оптимальные по параметрам  $g_e$  и дымности ОГ углы наклона боковой поверхности, равные 20...50° (варианты 2 и 11). Уровень содержания  $NO_x$  в ОГ при этом (угол опережения впрыскивания топлива 0 и 4 град п. к. в. до ВМТ) был на уровне  $(5...6) \cdot 10^{-4}$  %. При увеличении  $\theta$  до 8 и 12° и оптимальных с точки зрения  $g_e$  и дымности ОГ углов наклона боковой стенки (20...50°) несколько увеличилось содержание  $NO_x$  в ОГ (в среднем на  $2,5 \cdot 10^{-4}$  %) по сравнению с вариантами 10 и 12. Наихудшей из исследованных (варианты 14, а, б, в и г) является округленная стандартная форма кромки горловины (вариант 14, а). Центральный выступ (вариант 13) позволяет улучшить топливную экономичность, но приводит к увеличению содержания  $NO_x$  в ОГ.

На основании проведенных исследований фирма "Перкинс" разработала малотоксичный рабочий процесс, именуемый "Squish Lip" для высокооборотных дизелей жидкостного охлаждения с  $S/d = 127/98,4$  мм [17]. Камера сгорания этих дизелей – дельтовидная. Вытеснительное действие боковых поверхностей поршня усиливает завихрение воздушного заряда при перетекании его из надпоршневого пространства в КС на 10...20 % по сравнению с традиционной тороидальной КС. Распылитель имеет четыре сопловых отверстия. При снижении  $\theta$  до 0 град п. к. в. период задержки воспламенения не превышает 5 град п. к. в. За период задержки воспламенения в этом процессе по-

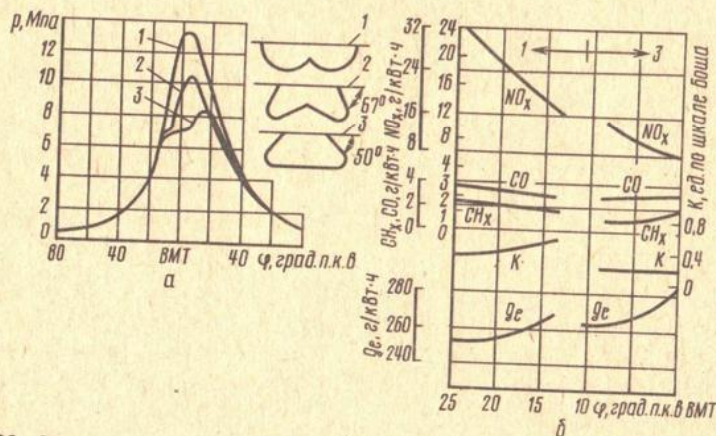


Рис. 22. Сравнительные характеристики дизеля Т6-3544 при работе с различными камерами сгорания при полной нагрузке и  $n = 2600$  мин<sup>-1</sup>:

а – индикаторные диаграммы; б – токсические характеристики; 1 – тороидальная КС; 2 – КС "Squish Lip" первого поколения; 3 – КС "Squish Lip" второго поколения

дается небольшое количество топлива, чем достигается небольшая скорость нарастания давления в цилиндре (рис. 22, а).

В КС первого поколения угол наклона боковой поверхности к плоскости днища равен 67°, в КС второго поколения – 50°, а отношение диаметра горловины к максимальному диаметру камеры соответственно 0,48 и 0,36.

В дизеле с КС второго поколения начало впрыскивания и выделения теплоты сдвинуто примерно на 10 град п. к. в. по отношению к серийной тороидальной КС, что позволяет уменьшить максимум скорости выделения теплоты с 200 до 85 Дж/град п. к. в. Данные по результатам исследования токсичности и дымности ОГ рабочих процессов фирмой "Перкинс" для дизелей серийного и КС второго поколения представлены на рисунке 22, б.

Оптимальная экономичность дизеля с КС второго поколения на режиме номинальной мощности получена при величине  $\theta = 9$  град п. к. в. до ВМТ. Токсичность рабочего процесса может быть уменьшена за счет дальнейшего снижения угла опережения впрыскивания топлива.

В таблице 16 приведены сравнительные характеристики токсичности ОГ по тринадцатиступенчатому циклу (США) для дизелей Т6-3543 и Т6-3544.

16. Токсичность ОГ дизелей "Перкинс"

| Дизель                             | Выброс вредных веществ, г/кВт · ч |      |        |      |
|------------------------------------|-----------------------------------|------|--------|------|
|                                    | $NO_x$                            | CO   | $CH_x$ | C    |
| Т6-3543 с открытой тороидальной КС | 33,8                              | 13,7 | 3,1    | 36,9 |
| Т6-3544 с открытой тороидальной КС | 29,8                              | 4,0  | 2,0    | 31,8 |
| Т6-3544 с КС первого поколения     | 10,6                              | 4,4  | 3,1    | 13,7 |
| Т6-3544 с КС второго поколения     | 8,7                               | 3,9  | 1,5    | 10,2 |

Мощность дизелей серии Т6-3544 при прочих равных условиях 116 кВт против 105 кВт (с КС "Squish Lip"), а экономичность соответственно 240 г/кВт·ч против 250 г/кВт·ч. В случае применения КС первого поколения при сохранении дымности ОГ величина  $\theta$  снижается до 10 град п. к. в. до ВМТ вместо 25 град п. к. в. до ВМТ у дизеля с серийной тороидальной КС. Соответственно выброс  $NO_x$  с ОГ снижен на 70 %, а величина  $p_z$  уменьшена с 13,4 до 11,4 МПа. Уменьшены также скорость нарастания давления в цилиндре и шумность работы двигателя при некотором ухудшении топливной экономичности.

Дальнейшее снижение токсичности ОГ дизеля при применении КС второго поколения получено за счет ухудшения топливной эконо-



мичности до 270 г/кВт·ч при снижении  $p_z$  до 8,3 МПа, скорости нарастания давления в цилиндре с 1,0 до 0,3 МПа/град п. к. в. и шума на 3 дБ.

Таким образом, процесс "Squish Lip" обеспечивает снижение выброса  $\text{NO}_x$  с ОГ на 75 % при снижении  $p_z$  на 40 % и шума от 3 до 8 дБ.

Интересен опыт разработки малотоксичного рабочего процесса с объемным смесеобразованием, полученный в последние годы.

Особенностью рабочего процесса "Duotherm", разработанного в ФРГ фирмой "Elsbett-Konstruktion" (Elko), является впрыскивание топлива с помощью односопловой или штифтовой форсунки в центр асимметричной КС, имеющей сферическую форму с подрезанной верхней частью (рис. 23). При положении поршня в ВМТ носок распылителя форсунки находится в зоне кромки КС. В камере сгорания организован интенсивный воздушный вихрь, который при взаимодействии с факелом впрыскиваемого топлива формирует в центре камеры топливоздушную смесь стехиометрического состава, окруженную оболочкой обедненной смеси. В турбонадувном варианте в этой оболочке находится до 30 % всего воздушного заряда. Сформированный в камере вихрь отличается пониженной турбулентностью [71].

Процесс "Duotherm" (с объемным смесеобразованием) отличается низкой скоростью впрыскивания топлива, уменьшенным теплоотводом вследствие изоляции зоны сгорания от стенок КС оболочкой из бедной смеси, небольшой начальной скоростью тепловыделения (низкой скоростью нарастания давления и малой жесткостью процесса сгорания), но расширенным участком постоянной увеличенной скорости тепловыделения и резким спадом ее в конце такта расширения.

В связи с тем что в локальных зонах сгорания с высокой температурой практически отсутствует свободный кислород (смесь стехиометрического состава), процесс отличается очень низким содержанием  $\text{NO}_x$  в ОГ (рис. 24, а).

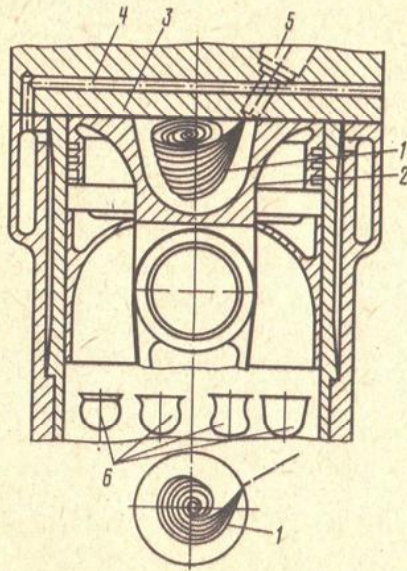


Рис. 23. Схема смесеобразования фирмы "Elko":

1 - форма топливного факела; 2 - поршень с поверхностью скольжения в зоне выше уплотнительного пояса; 3 - головка цилиндра; 4 - сверление для охлаждения форсунки; 5 - форсунка; 6 - формы КС в поршне для процесса смесеобразования с однодырчатой форсункой

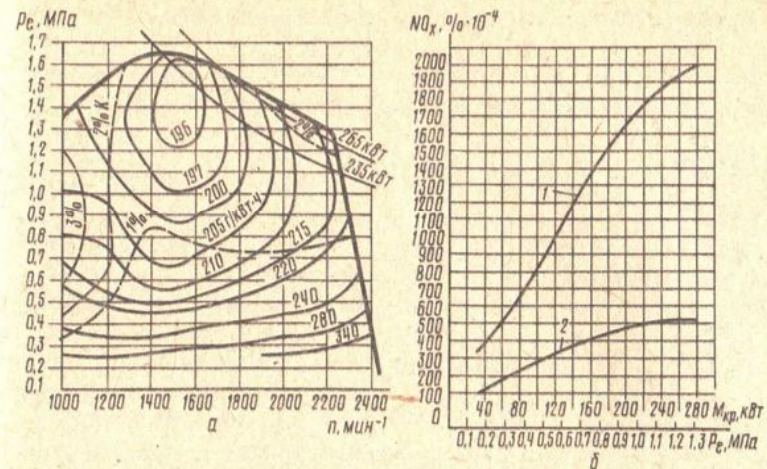


Рис. 24. Многопараметровая характеристика (а) и токсичность ОГ (б) по  $\text{NO}_x$  дизеля "Elko":

1 - серийный дизель; 2 - малотоксичный дизель

Отсутствие топлива в холодных пристеночных слоях приводит к низкому содержанию в ОГ и  $\text{CH}_x$ . Процесс отличается низкой дымностью, улучшенной топливной экономичностью (рис. 24, б), низким уровнем шума, хорошей приспособленностью к работе на альтернативных топливах.

На базе процесса "Duotherm" фирма создала семейство дизелей с внутренним масляным охлаждением, предназначенных для установки на автомобили и тракторы. Поршни этих дизелей выполнены разъемными, состоящими из днища (чугун) и юбки (алюминий или чугун), которые соединяются поршневым пальцем и не соприкасаются. Днище обеспечивает уплотнение КС; юбка, выполняющая функции направляющей части, не контактирует с КС и является относительно холодной, а также интенсивно охлаждается струями масла, которое подводится также и на внутреннюю поверхность сухой гильзы цилиндра. В сборе с поршневым пальцем конструкция поршня по массе на 20 % легче массы алюминиевого поршня обычного высокофорсированного дизеля.

В дизелях "Elko" в головке блока цилиндров охлаждается только перемычка между клапанами, чем снижен теплоотвод в систему охлаждения на 25 %, а именно с 1875 до 1400 кДж/кВт.

Сравнительные данные дизеля фирмы "Elko" даны в таблице 17.

### 17. Сравнительные данные дизеля фирмы "Elko"

| Параметры дизеля  | Фирмы                 |            |
|---|-----------------------|------------|
|   | "Volvo",<br>"Rikardo" | "Elko"     |
| Число цилиндров   | 3                     | 3          |
| $iV_h$ , см <sup>3</sup>  | 1279                  | 1387       |
| Диаметр поршня, мм  | 79                    | 80         |
| Ход поршня, мм  | 87                    | 92         |
| Максимальная мощность по DIN<br>(при $n$ , мин <sup>-1</sup> ), кВт | 39 (4300)             | 66 (4500)  |
| Максимальный крутящий момент<br>(при $n$ , мин <sup>-1</sup> ), Н·м | 90 (3420)             | 165 (3000) |
| Степень сжатия $\epsilon$   | 20                    | 18         |
| Система турбонаддува  | Гаррет Т2             | ККК К24    |
| Система охлаждения  | Водяная               | Масляная   |
| Масса, кг   | 98                    | 130        |

При установке на автомобиль дизеля "Elko" мощностью 58 кВт получены следующие данные по выбросам вредных веществ: CO — 0,712 г/км, CH<sub>x</sub> — 0,138, NO<sub>x</sub> — 0,724, частицы — 0,094 г/км.

Процесс, характеризующий тенденцию гомогенизации топливозо-воздушной смеси, разработан также и японской фирмой "Тойота". В соответствии с предложенным техническим решением впрыскивание топлива в КС осуществляется с помощью однодырчатой форсунки с углом раскрытия топливного факела 30...120° в камеру в поршне, имеющую форму тела вращения, близкую к форме топливного факела. Топливо воспламеняется и сгорает в объеме КС, не соприкасаясь со стенками. Варианты процесса включают центральное расположение форсунки 9 (рис. 25, а), установленной по оси цилиндра, и периферийную установку форсунки при ее наклонном положении (рис. 25, б). В последнем случае в горловине 7 поршня 4 выполняют проточку 13, обеспечивающую впрыскивание топлива в объем КС без попадания на стенки. По мнению разработчиков, в данном процессе обеспечивается использование всей массы окислителя (кислорода), содержащегося в объеме КС, что позволяет заметно улучшить экономичность дизеля, а также токсичность и дымность ОГ.

Формирование малотоксичного рабочего процесса может быть обеспечено при организации управляемого впрыскивания топлива, в частности разделенного, при котором достигается снижение максимального давления сгорания при росте среднего эффективного давления, снижение выброса с ОГ оксидов азота и дымности ОГ.

Рабочий процесс дизеля при осуществлении двойной топливоподачи характеризуется умеренной скоростью тепловыделения в первом периоде сгорания и относительным возрастанием ее интенсивности во

втором периоде, что благоприятно сказывается на снижении образования в цилиндрах вредных веществ.

Перечисленные положительные качества вызвали повышенный интерес ведущих институтов и фирм к разработке систем двойной топливоподачи.

Управление характеристиками впрыскивания при разделении цикловой подачи топлива имеет свои особенности. Основное внимание уделяется дозированию величины "запальной" порции топлива, которая на номинальном режиме составляет 12...18% от суммарной цикловой подачи для большинства типов КС с непосредственным впрыскиванием топлива. Управление законом изменения относительной величины запальной порции топлива при изменении нагрузки или частоты вращения учитывает два фактора: сохранение удельного расхода топлива на уровне обычного впрыскивания и уменьшение периода задержки самовоспламенения топлива основной порции.

Предварительная физико-химическая подготовка запальной порции топлива и ее воспламенение перед началом впрыскивания основной порции приводят к сокращению периода задержки самовоспламенения. Уменьшается доля топлива, участвующая в воспламенении основной порции, что приводит к снижению максимальной скорости сгорания и, следовательно, к улучшению динамики рабочего цикла. Это способствует уменьшению тепловой и механической напряженности, снижению дымности и токсичности, уменьшению уровня вибрации и шума дизеля.

Осуществление разделенного впрыскивания топлива возможно у высокооборотных дизелей с относительно малыми размерами цилиндра без существенной переделки серийной топливной аппаратуры в случае подачи запальной порции топлива в конце такта выпуска —

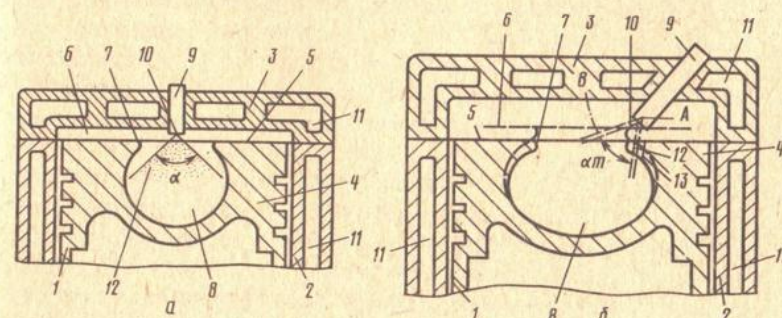


Рис. 25. Камера сгорания, реализующая объемный процесс смесеобразования с вертикальным (а) и наклонным (б) расположением форсунки:

1 — боковая поверхность поршня; 2 — цилиндр; 3 — головка цилиндра; 4 — поршень; 5 — днище поршня; 6 — надпоршневой зазор; 7 — горловина поршня; 8 — камера в поршне; 9 — форсунка; 10 — основание струи; 11 — р-башка охлаждения; 12 — факел топлива; 13 — проточка в горловине

начале такта впуска. (Необходимо впрыснуть запальную порцию топлива не на гильзу, а на поверхность КС, образуемую верхним днищем поршня.)

Несоблюдение этого условия приводит к попаданию части топлива на гильзу цилиндра, откуда оно испаряется хуже, чем с поверхности поршня; далее топливо попадает в масло с постепенным разжижением последнего, и, следовательно, имеет место перерасход топлива при резком снижении срока службы масла.

Переход на разделенное впрыскивание топлива при сохранении штатных (заводских) регулировок ТНВД может сводиться к изменению профиля кулачка вала привода — применение на них дополнительного малого выступа для подачи запальной порции топлива. При этом выступ для подачи основной порции топлива оставлен без изменения по форме и ориентации на кулачковом валике. Необходимо отметить, что после подачи запальной порции плунжер ТНВД возвращается в НМТ и, следовательно, для подачи основной порции топлива может использоваться его полный ход. Общая цикловая подача, таким образом, может быть увеличена без изменения конструкции ТНВД.

Запальная порция топлива не должна быть малой, иначе при впрыскивании в начале такта впуска она распределится в объеме цилиндра. Впрыснутое топливо успевает полностью испариться, и тогда образуется неоднородная по своему составу бедная смесь и предварительных центров подготовки воспламенения топлива не возникнет.

Если же запальная порция топлива больше оптимального значения, самовоспламенение топливовоздушной смеси происходит с опережением (раньше предусмотренного времени).

Если угол между линиями выступов кулачков, соединяющими ось кулачкового вала с точкой максимальной высоты кулачка, меньше оптимальной величины, то подача запальной порции топлива происходит в конце такта впуска и в начале такта впуска — при этом значительная часть топлива удаляется из цилиндра вместе с ОГ в процессе такта впуска, что приводит к ухудшению экономических показателей цикла. Если угол между линиями выступов кулачков, соединяющими ось кулачкового вала с точкой максимальной высоты кулачка, больше оптимального, т. е. в период времени, когда поршень уже продвинулся от ВМТ (во время такта впуска) на величину, позволяющую топливному факелу беспрепятственно достигнуть гильзы цилиндра, с которой топливо испаряется хуже, чем с поверхности поршня, то это приводит к увеличению дымности и токсичности при ухудшении экономических показателей рабочего цикла дизеля.

При испытаниях дизеля Д-160 с двойной системой топливоподачи (по ОСТ 23.1.440-76 и ОСТ 23.1.441-76) получены следующие значения оценочных удельных выбросов вредных веществ и дымности ОГ.

Для дизелей в серийной комплектации:  $q_{NO_{x_{оц}}} = 27,5$  г/кВт · ч;

$q_{CO_{оц}} = 1,2$  г/кВт · ч; дымность ОГ — 41,5 % по шкале дымомера "Хартридж".

Для дизеля в малотоксичной комплектации:  $q_{NO_{x_{оц}}} = 21,9$  г/кВт · ч;  $q_{CO_{оц}} = 3,6$  г/кВт · ч; дымность ОГ — 2,6 % по шкале дымомера "Хартридж".

Для распределительного насоса ЦНИИМ и РСХИ разработана специальная система топливоотдачи. Она работает следующим образом.

При подаче предварительной дозы топлива в первый цилиндр плунжер 4 (рис. 26) повернут основным отсечным окном 6 в сторону нижней торцевой дозирующей кромки дозатора 12, обеспечивая подачу меньшей порции топлива. При этом дополнительное отсечное окно 8 повернуто в сторону верхней торцевой дозирующей кромки дозатора 11 и в отсечке предварительной дозы топлива не участвует (рис. 26, г и д); одно из распределительных окон плунжера 5 располагается напротив нагнетательного канала гильзы, а другое направлено в сторону глухой поверхности, обеспечивая нагнетание предварительной дозы топлива в первый цилиндр (рис. 26, в). Для подачи предварительной дозы топлива во второй цилиндр плунжер 4 поворачивается на  $90^\circ$ , взаимное расположение отсечных окон плунжера и торцевых дозирующих кромок дозатора (рис. 26, ж и з) аналогично их взаиморасположению при подаче предварительной дозы топлива в первый цилиндр, а одно распределительное окно 5 располагается напротив нагнетательного канала второго цилиндра гильзы, обеспечивая нагнетание топлива во второй цилиндр дизеля. Для подачи основной порции топлива в первый цилиндр плунжер 4 поворачивается на тупой угол  $\alpha$  по отношению к своему положению при подаче предварительной дозы топлива в первый цилиндр дизеля ( $\alpha$  — угол между моментом закрытия выпускного клапана и, следовательно, как отмечалось ранее, моментом начала подачи предварительной дозы топлива и моментом начала подачи основной дозы топлива).

При этом благодаря расположению распределительных окон 5 под тупым углом  $\alpha$  по отношению одно к другому второе распределительное окно располагается напротив нагнетательного канала первого цилиндра гильзы 1, а первое направлено в сторону глухой поверхности этой гильзы (рис. 26, и).

Основное отсечное окно 6 повернуто в сторону верхней торцевой дозирующей кромки дозатора 11, а дополнительное отсечное окно 8 — в сторону нижней торцевой дозирующей кромки дозатора 12 (рис. 26, к и л), причем благодаря равной разности высот между верхней кромкой основного отсечного окна 7 и верхней кромкой дополнительного отсечного окна 9 и между верхней 11 и нижней 12 торцевыми дозирующими кромками дозатора отсечка основной дозы топлива происходит одновременно обоими отсечными окнами, обеспечивая резкое падение давления в трубопроводе и форсунке, быструю посадку иглы

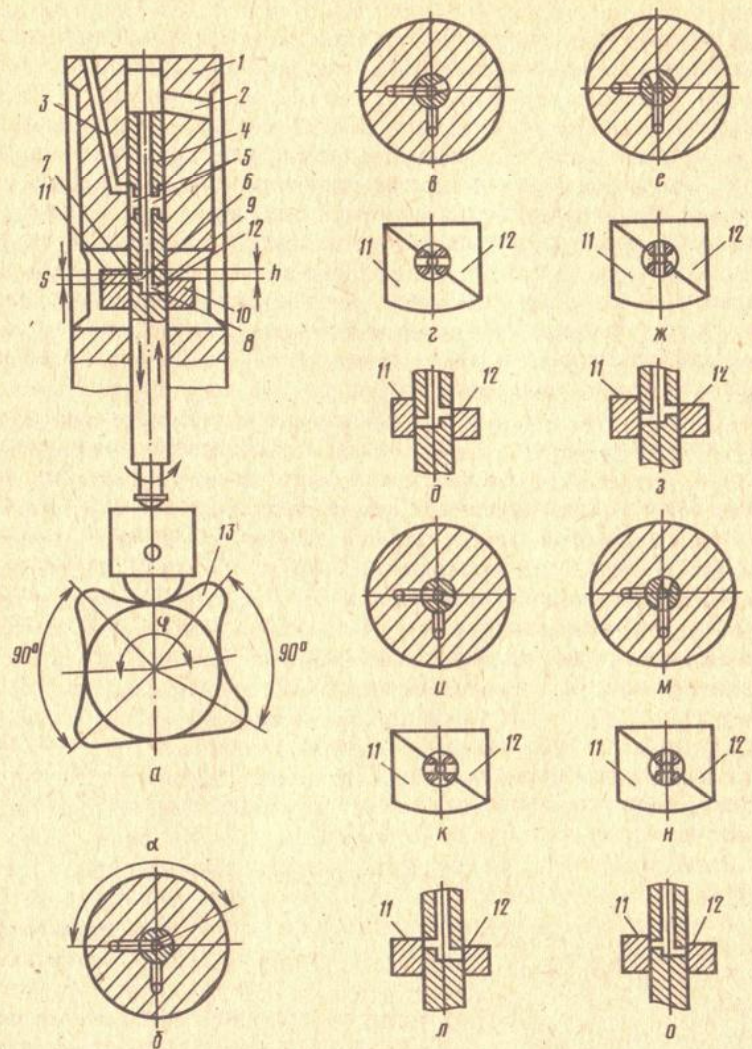


Рис. 26. Топливный распределительный насос двойной топливоподачи:

1. — гильза; 2 — наполнительный канал; 3 — нагнетательный канал; 4 — плунжер; 5 — распределительные окна; 6 — отсечное окно; 7 — верхняя кромка; 8 — дополнительное отсечное окно; 9 — верхняя кромка дополнительного отсечного окна; 10 — дозатор; 11 — верхняя торцовая дозирующая кромка; 12 — нижняя торцовая дозирующая кромка; 13 — кулачковый вал

распылителя на седло и улучшение протекания конечной фазы впрыскивания.

Для подачи основной дозы топлива во второй цилиндр дизеля плунжер поворачивается на  $90^\circ$ , совмещая распределительное окно плунжера 5 с нагнетательным каналом второго цилиндра гильзы (рис. 26, м). Взаимное расположение основного и дополнительного отсечных окон верхней и нижней торцовых дозирующих кромок (рис. 26, н и о) аналогично их взаиморасположению при впрыскивании основной дозы топлива в первый цилиндр дизеля. Разница между основной и предварительной дозами топлива определяется разностью высот между верхней 11 и нижней 12 торцовыми дозирующими кромками дозатора, которая равна  $0,75 \dots 0,95$  максимального активного хода плунжера. При этом предварительная доза топлива равна  $10 \dots 30\%$  максимальной цикловой подачи топлива. Углы  $\alpha$  и  $\varphi$  для современных дизелей находятся в диапазоне  $155 \dots 170^\circ$ .

Таким образом, конструкция обеспечивает согласование фаз газораспределения дизеля с фазами впрыскивания основной и предварительной доз топлива, лучшую отсечку топлива, и, следовательно, оба этих мероприятия обеспечивают повышение экономичности дизеля.

У современных и перспективных дизелей выпускные клапаны закрываются при  $20 \dots 25^\circ$  после ВМТ такта выпуска, а угол опережения впрыскивания топлива равен  $20 \dots 35^\circ$  ( $12 \dots 25^\circ$  по реальному впрыскиванию топлива в цилиндр) до ВМТ такта сжатия. Следовательно, угол между основным и предварительным впрыскиванием по повороту коленчатого вала находится в диапазоне от  $340$  до  $310^\circ$ , а по насосу — от  $170$  до  $155^\circ$ .

Для дизеля Д-120, на котором была установлена система двойной топливоподачи при величине дополнительной порции топлива ( $\sim 15\%$ ), получено снижение оценочного выброса оксидов азота на  $11 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ , а дымность снижена на  $15 \dots 18\%$ .

## 6. 2. ПОДАЧА ТОПЛИВА НА ВПУСКЕ

**Подача легкого топлива.** Вопросами подачи легкого топлива на впуске ДВС еще в 30-е годы занимался А. Д. Чаромский. Целый ряд работ был выполнен по исследованию влияния подачи легкого топлива на впуске тракторных дизелей в МИИСПе [20...23]. Проведенные исследования показывают, что обогащение воздушного заряда на впуске дизеля способствует организации диффузионно-химического распространения пламени и в объеме КС содействует подготовке химически активной среды, способной самостоятельно порождать новые активные центры. Повышение скорости распространения пламени благоприятно влияет на уменьшение догорания, снижение тепловых потерь, способствует увеличению индикаторного КПД. Правильная, высокоэффективная организация процесса сгорания в дизеле в значительной мере

связана со смесеобразованием, предварительной подготовкой смеси и более ранним, чем в обычном дизеле, развитием предпламенных процессов.

В результате испытаний по дизельному и бензодизельному процессам установлено, что мощность дизелей с неразделенными КС повышается на 25...30 %, вихрекамерных — на 20...25 %. Минимальные удельные расходы топлива снижаются при этом на 4...6 % и выдерживаются в значительно большем интервале нагрузок, чем при обычной работе дизеля. Температура ОГ дизелей ниже при работе с подачей топлива на впуске, что объясняется меньшими расходами топлива. Для работы дизеля с подачей топлива на впуске установочный угол опережения начала впрыскивания топлива должен быть на 2...3° меньше, чем при работе по дизельному процессу. Для различных типов дизелей оптимальное количество топлива, подаваемого на впуске, различно и должно устанавливаться для каждой модели отдельно, исходя из условий работы и скоростного режима. Имеются сведения о влиянии различных присадок, бензина и ДТ, подаваемого на впуске, на показатели работы и процесс сгорания в дизеле.

При работе дизеля с подачей легкого топлива или ДТ на впуске необходимо учитывать начальную концентрацию активных центров, полученную в результате дополнительной инициации. Подача топлива на впуске увеличивает суммарную скорость реакций, протекающих в цилиндре дизеля, уменьшает период задержки самовоспламенения. Причем это уменьшение прогрессирует не только с ростом концентрации, но и с изменением физико-химических свойств, влияющих на образование новых активных центров. Исследования [21] показали, что при подаче легкого топлива на впуске на индикаторных диаграммах отчетливо видны стадии холодного и голубого пламени и соответствующие им периоды задержки воспламенения.

Установлено [22, 23], что в дизелях при холоднопламенном самовоспламенении горючей смеси ионизационный ток протекает главным образом в силу химической природы ионизации. При этом большое значение имеют концентрация и физико-химические свойства топлива, используемого для подачи на впуске. В результате экспериментов доказано, что значительные ионизационные токи в предпламенной зоне имеют обратный знак по отношению к ионизационным токам пламени. При подаче легкого топлива предпламенные ионизационные токи больше, чем при дизельном процессе. Нарастание их значений происходит медленно и связано с термическими и химическими процессами образования заряженных частиц.

Отмечено, что колебательные процессы в ионизационном токе пламени, свидетельствующие о неоднократности его протекания, заметнее прослеживаются на токах дизельного процесса. Сглаживание колебаний при подаче легкого топлива на впуске имеет положительное значение.

Анализ осциллограмм ионизационных токов в предпламенный период позволяет сделать вывод о том, что в условиях среды с повышенными температурами и давлением при наличии достаточной концентрации перекисей, радикалов и неустойчивых промежуточных соединений, а также под воздействием стенок образование ионов может протекать с достаточной интенсивностью. Поскольку ионизационные токи при подаче легкого топлива на впуске выше, чем при дизельном процессе (как в предпламенный период, так и во время развития пламени), а величина тока пропорциональна температуре, то не вызывает сомнения положительное влияние на процесс сгорания, скорость распространения пламени при работе дизеля с подачей легкого топлива на впуске.

Индикаторные диаграммы дизеля Д-21А1 (2Ч 10,5/12) трактора Т-25А при работе по дизельному циклу и с подачей бензина на впуске для частоты вращения 1800 и 2000 мин<sup>-1</sup> представлены на рисунке 27.

Индицирование проводилось при оптимальных равных секундных расходах дизельного и с подачей легкого топлива на впуске процессах на оптимальном для бензодизельного процесса установочном угле опережения начала впрыскивания топлива. Из графиков видно, что на обоих скоростных режимах подача бензина на впуске уменьшает угол, соответствующий периоду задержки воспламенения. Снижение периода задержки воспламенения составляет 12...15 %. Такое сокращение объясняется в первую очередь ускорением предпламенных процессов, происходящих при подаче легкого топлива на впуске дизеля. При этом увеличивается скорость сгорания топлива, уменьшается догорание и улучшается использование выделившейся теплоты. При подаче легкого топлива на впуске при равных по сравнению с дизельным процессом расходах топлива наблюдается повышение максимального давления цикла на 3...8 %. При оптимальных количествах подаваемого легкого топлива на впуске снижается "жесткость" работы дизеля на 8,5...14,5 %. Это объясняется тем, что при подаче бензина на впуске горение происходит более плавно по сравнению с горением при работе по дизельному процессу, а угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, снижается на всех скоростных режимах.

Результаты анализа представленных ранее индикаторных диаграмм, обработанных по методике ЦНИИМ на ЭВМ ЕС 1020, представлены на рисунке 28. Из графиков видно, что кривая скорости тепловыделения  $dx/d\varphi$  более плавная, продолжительность условного выгорания топлива сокращается.

При переходе на работу с подачей легкого топлива на впуске сокращаются максимальное значение  $(dx/d\varphi)_{\max}$ , максимальная усредненная температура цикла. Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период при работе с подачей легкого топлива на впуске приводит к снижению доли потерь теплоты в начальный период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что пре-

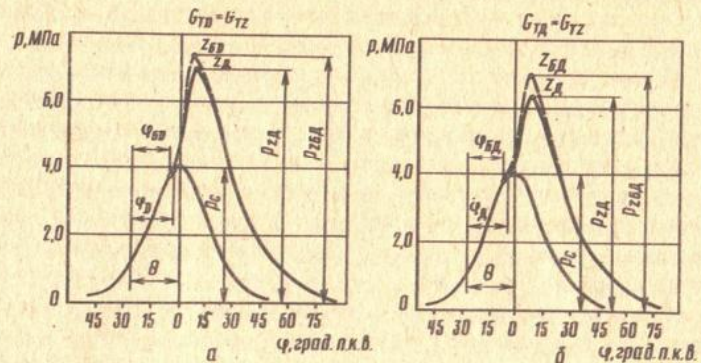


Рис. 27. Индикаторные диаграммы дизеля Д-21А1 (2С 10,5/12) при работе с подачей легкого топлива на впуске:

а — при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б — при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — дизельный процесс; - - - с подачей легкого топлива на впуске

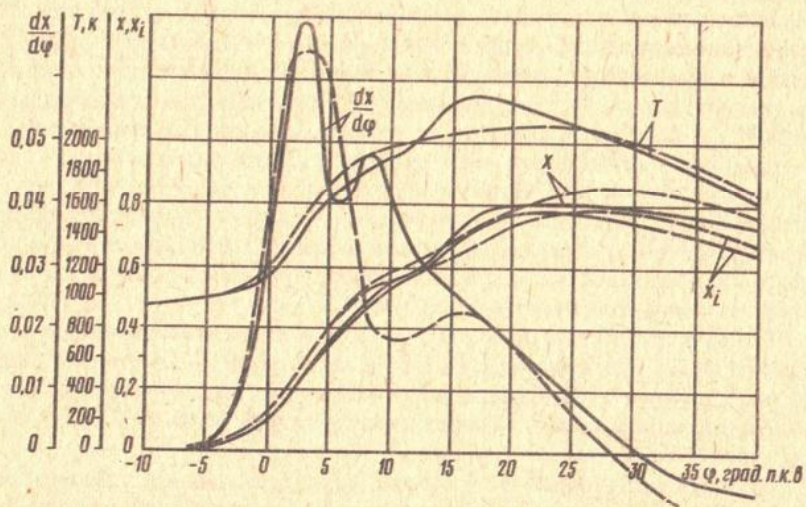


Рис. 28. Графики динамики выделения теплоты  $dx$ , усредненной температуры газов в цилиндре  $T$ , скорости отвода теплоты  $x$  и полезного выделения теплоты  $x_i$  в функции угла поворота коленчатого вала для  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

— — — дизельный процесс; - - - с подачей легкого топлива на впуске

допределяет более эффективное использование теплоты в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

Анализ нагрузочных характеристик дизеля Д-21А1 показывает, что подача легкого топлива на впуске благоприятно влияет на работу дизеля. Удельный расход топлива снижается и сдвигается в сторону больших нагрузок, создавая таким образом возможность форсирования дизеля по нагрузке. Прирост среднего эффективного давления при подаче топлива на впуске составляет для этого дизеля 11...12% в зависимости от частоты вращения. Это соответствует приросту мощности 6...7%. Расход бензина составляет для частоты  $1800 \text{ мин}^{-1}$  23% расхода ДТ или соответственно 0,275 и 1,194 г/с. При сравнении дизельного процесса и процесса с подачей легкого топлива на впуске при одинаковом удельном эффективном расходе мощность дизельного процесса составляет 18,08 кВт, а с подачей легкого топлива — 23,08 кВт. Прирост мощности при этом составляет 27,6%. Анализ регулировочных и нагрузочных характеристик работы дизеля Д-21А1 при работе с подачей легкого топлива на впуске показывает, что улучшение экономических и мощностных показателей работы дизеля происходит под воздействием улучшения организации диффузионно-химического распространения пламени и в объеме КС содействует приготовлению химически активной среды, способной самостоятельно порождать новые активные центры.

Интенсивное воздействие подачи легкого топлива на процесс сгорания не может не оказывать влияние на содержание токсичных компонентов в ОГ, особенно  $\text{NO}_x$ . При этом необходимо учитывать, что сни-

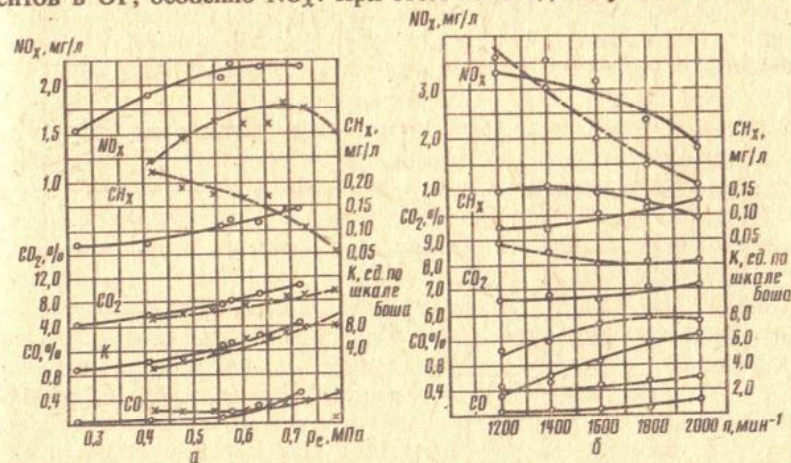


Рис. 29. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при подаче бензина на впуске в зависимости:

а — от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б — от частоты вращения; — — — дизельный процесс; - - - с подачей легкого топлива на впуске

жается установочный угол опережения начала впрыскивания топлива, а это, в свою очередь, благоприятно влияет на снижение  $\text{NO}_x$  в ОГ.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при подаче легкого топлива на впуске в зависимости от нагрузки представлено на рисунке 29, а. Из графиков видно, что содержание  $\text{NO}_x$  снижается на всех режимах работы при подаче легкого топлива на впуске. На малых нагрузках эффект несколько выше. На номинальной нагрузке снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ составляет до 22%. Увеличение содержания в отработавших газах  $\text{CO}_2$  и С при подаче легкого топлива на впуске сдвигается в сторону больших нагрузок. Содержание токсичных компонентов дизеля Д-21А1 в зависимости от частоты вращения представлено на рисунке 29, б. Содержание  $\text{NO}_x$ , как видно из графиков, снижается во всем диапазоне частот вращения, а наибольший эффект наблюдается при 1700...2000 мин<sup>-1</sup>.

Снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля при работе с подачей легкого топлива на впуске объясняется совместным эффектом от снижения установочного угла опережения начала впрыскивания топлива и изменений условий сгорания при обогащении воздуха дополнительным топливом. Наличие в любой точке КС топливовоздушной смеси к началу впрыскивания ДТ уменьшает локальные коэффициенты избытка воздуха по сравнению с впрыскиванием ДТ в чистый воздух. Молекулы легкого топлива, прошедшие предпламенную подготовку, более активно вступают в реакцию с кислородом, уменьшая вероятность окисления азота.

Подача легкого топлива на впуске дизелей не только улучшает процесс физической подготовки топливовоздушной смеси, но и в значительной мере влияет на протекание процесса активного тепловыделения, что в значительной мере изменяет условия образования токсичных компонентов в ОГ (в первую очередь  $\text{NO}_x$ ).

Системы подачи топлива на впуске могут быть различны, но наибольшее распространение получили простейшие карбюраторы (типа К-16) без дроссельной заслонки, к которым подводят бензин из специального бака [24]. Возможно применение карбюраторов, аналогичных применяемым, для подачи воды во впускной трубопровод, подробно рассмотренных в подразделе 6.3.

Карбюратор устанавливают на впускном трубопроводе дизеля. Расход топлива через такой карбюратор зависит только от разрежения воздуха на впуске, т. е. от частоты вращения коленчатого вала дизеля. Карбюратор оборудуют устройством для начального регулирования расхода топлива вручную. Кроме этого, у рабочего места тракториста необходимо разместить кран для отключения подачи топлива при работе дизеля на холостом ходу и малых нагрузках, так как в противном случае на этих режимах ухудшается топливная экономичность.

Начальное регулирование расхода бензина на максимальную мощность дизеля осуществляется следующим образом. Дизель выводят на

режим максимальной частоты вращения холостого хода, после чего постепенно вручную увеличивают подачу бензина в карбюратор до тех пор, пока не появятся характерные детонационные стуки и значительное дымление ОГ. После этого немного уменьшают подачу бензина и фиксируют регулировочное устройство. Регулировать карбюратор на подачу можно с помощью тормозного стенда на режиме номинальной мощности. Регулировка таким способом будет более качественной.

Исследования, посвященные износу дизелей при работе с подачей топлива на впуске, показывают, что износ деталей ЦПГ не увеличивается. Содержание железа в масле при работе с подачей топлива на впуске не увеличивается. Результаты анализа масла при работе дизеля СМД-14 по дизельному процессу и процессу с подачей легкого топлива на впуске в стендовых условиях представлены в таблице 18 [25].

18. Сравнительные данные анализа масла

| Показатели                         | Свежее масло      |                                     | Масло после работы        |   |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|
|                                    | Дизельный процесс | С подачей легкого топлива на впуске | Дизельный процесс (163 ч) | С подачей легкого топлива на впуске (180 ч) |
| Вязкость, мм <sup>2</sup> /с       | 10,35             | 9,92                                | 14,26...13,63             | 10,85                                       |
| Зольность нефилтрованного масла, % | 0,23              | 0,275                               | 0,25...0,29               | 0,271                                       |
| Механические примеси, %            | 0,023             | —                                   | 0,083                     | 0,246                                       |
| Содержание железа в 100 г масла, г | —                 | —                                   | 0,0074                    | 0,0078                                      |

Влияние подачи легкого топлива на изнашивание дизеля Д-141 по результатам 120-часовых стендовых испытаний приведены в таблице 19.

Износ деталей ЦПГ и их загрязненность при подаче легкого топлива на впуске ниже, чем у дизельного процесса. Эксплуатационные испытания подтвердили результаты стендовых испытаний. Подача легкого топлива на впуске дизеля Д-21А1 трактора Т-25А не изменяла содержания продуктов изнашивания в масле. Физико-химический анализ картерного масла показал, что в период испытаний дизелей с подачей легкого топлива на впуске температура вспышки, кинематическая вязкость не изменяются по сравнению с контрольным; загрязненность масла ниже, чем у контрольного дизеля. При наработке 240 моточасов снижение составило 20...25 баллов. Разборка дизелей после этой наработки показала, что днища поршней, головки цилиндров, верхние пояса гильз цилиндров дизеля с подачей легкого топлива на впуске имеют

меньшее количество нагара, чем аналогичные детали контрольного дизеля. Замеры показали, что масса нагара составила 4,5 г у дизеля с подачей легкого топлива на впуске, в то время как у контрольного — 8,4 г.

### 19. Результаты стендовых испытаний дизеля Д-141 на износ

| Показатели   | Условия испытаний                                    |  |
|--|--|--|
|  | Дизельный процесс<br>( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ) | С подачей легкого топлива на впуске<br>( $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$ ) |
| Загрязненность ЦПГ, баллы                                    | 9,53   | 7,45   |
| Износ деталей дизеля, г                                      | 1,36   | 1,20   |
| Масса отложений в центрифуге, г                              | 112,90   | 95,20  |
| Увеличение вязкости картерного масла, $\text{мм}^2/\text{с}$ | 2,50   | 1,10   |
| Увеличение кислотного числа масла, мг/г                      | 1,64   | 1,68   |
| Щелочное число масла к концу испытаний, мг/г                 | 2,70   | 2,80   |

В целом можно отметить, что, несмотря на увеличение номинальной нагрузки (до 25%), при работе дизеля с подачей легкого топлива на впуске износы деталей равны или ниже износов деталей двигателей, работающих по дизельному процессу; снижаются расход масла на угар, загрязненность деталей ЦПГ, количество нагара на поршне и головке цилиндров, количество отложений в центрифуге.

**Подача дизельного топлива.** На практике при осуществлении работы дизелей на различных топливах возникают определенные трудности. В связи с этим представляют интерес работы по исследованию снижения токсичности ОГ при подаче ДТ на впуске дизеля. Результаты испытаний вихрекамерного дизеля при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и подаче ДТ на впуске на содержание в отработавших газах  $\text{NO}_x$  и экономичность представлены на рисунке 30. Количество ДТ, подаваемого на впуске дизеля, задавалось в процентном отношении к расходу основного топлива, подаваемого насосом. Изменялась нагрузка дизеля и установочный угол опережения начала впрыскивания топлива. Из результатов экспериментов видно, что при заводской регулировке  $\theta$  ( $17^\circ$ ) подача топлива на впуске приводит к снижению  $\text{NO}_x$  в ОГ на 30...40% при давлении до 0,38 МПа. При этом увеличение количества ДТ, подаваемого на впуске, более интенсивно снижает  $\text{NO}_x$  в ОГ. При подаче 30% ДТ на впуске и при давлении больше 0,4 МПа наблюдается ухудшение экономических показателей дизеля, а его работа сопровождается появлением характерного стука — признака появления детонационных явлений. Уменьшение установочного угла опережения начала впрыскивания топлива приводит к снижению общего уровня концентрации  $\text{NO}_x$  в отработавших газах. При этом практического влия-

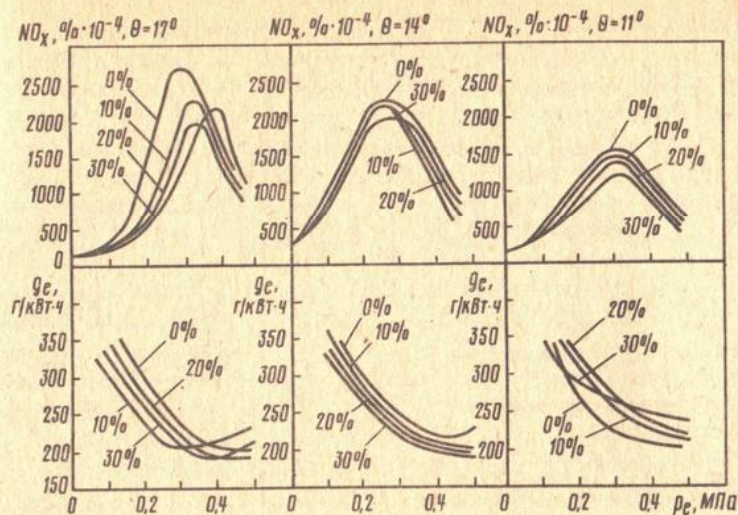


Рис. 30. Влияние подачи ДТ на впуске четырехтактного вихрекамерного дизеля на содержание оксидов азота в ОГ и удельный расход топлива

ния на содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ и удельный расход топлива подача ДТ на впуске не оказывает. Некоторое улучшение экономичности и снижение  $\text{NO}_x$  в ОГ характерно для подачи на впуске 10...20% ДТ. Увеличение его подачи до 30% приводит к снижению  $g_e$ , но при этом возрастает содержание в отработавших газах  $\text{NO}_x$ . Снижение установочного угла опережения начала впрыскивания топлива до 11 град п. к. в. приводит к дальнейшему снижению общего уровня концентраций  $\text{NO}_x$  в ОГ. Влияние подачи ДТ на впуске здесь весьма незначительно — уменьшение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ не превышает 18%. Одновременно увеличивается удельный расход топлива.

При работе дизеля с подачей ДТ на впуске концентрации  $\text{CH}_x$  и  $\text{CO}$  в ОГ возрастают в 2...3 раза, а сажи — практически не меняются.

### 6.3. ПОДАЧА ВОДЫ В ЦИЛИНДРЫ

Такой способ, как подача воды в цилиндры ДВС, начали применять еще на заре двигателестроения. Воду в цилиндры подавали в основном для снижения температуры деталей и увеличения антидетонационного эффекта. Целый ряд советских тракторных двигателей работали с использованием воды.

Интерес к этому способу возрос с точки зрения увеличения ресурсов топлива и снижения токсичности ОГ.

Существует достаточное количество способов подачи воды в ци-



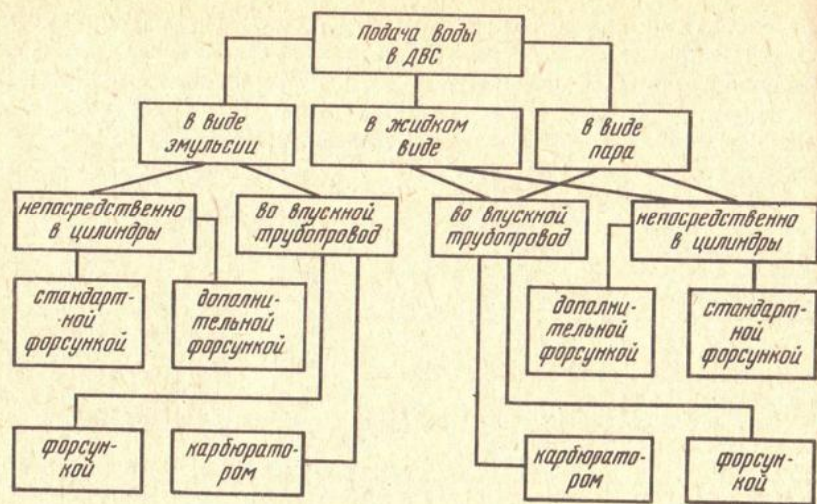


Рис. 31. Способы подачи воды в цилиндры ДВС

линдр ДВС, основные из которых представлены на рисунке 31. Наибольшее практическое применение нашли следующие способы: подача водотопливной эмульсии (ВТЭ) с помощью стандартной топливной аппаратуры; подача воды во впускной трубопровод с помощью карбюратора и форсунки.

**Подача водотопливных эмульсий.** Использование ВТЭ не требует значительных конструкционных переделок дизеля, позволяет использовать изменение технологии изготовления ДТ. Однако вместе с тем необходимо отметить, что исследований по применению ВТЭ на легких высокооборотных дизелях проводилось недостаточно [26, 27]. В автотракторных дизелях ВТЭ не нашли широкого применения, хотя этот способ имеет целый ряд преимуществ. Максимальное содержание воды в эмульсии не превышает 30...35 % по массе. При применении ВТЭ качественно улучшаются процессы смесеобразования и сгорания топлива. Снижается теплонапряженность деталей ЦПГ дизелей, создаются предпосылки для форсирования дизеля по мощности до 25 % без заметного повышения температуры деталей. При применении ВТЭ уменьшается уровень нагаро- и лакообразования, они легче удаляются. Уменьшается расход масла на угар. Применение эмульгированных топлив не вызывает увеличения скорости изнашивания и коррозию деталей ЦПГ. Существенно снижается дымность и токсичность ОГ (до 60 %) при использовании эмульгированных топлив за счет снижения содержания СО и NO<sub>x</sub>.

Водотопливные эмульсии представляют собой дисперсную систему, состоящую из капелек жидкости (дисперсной фазы), распре-

ленных в другой жидкости (дисперсной среде). В дизелях применяют обратные эмульсии типа "вода в масле", которые исключают контакт металлических поверхностей ТА и стенок трубопроводов с ВТЭ. В состав эмульсии для облегчения образования и повышения стабильности добавляют поверхностно-активные вещества — эмульгаторы. В качестве эмульгаторов применяют мазут (1...2 %), низшие спирты (менее 5 %) и их сложные эфиры (0,05...5 %). Вязкость эмульсий выше вязкости исходного топлива. С увеличением содержания воды вязкость эмульсии возрастает.

Важным показателем качества ВТЭ является стабильность. От нее во многом зависит надежность работы дизеля. Различают кинетическую и агрегативную стабильность.

**Кинетическая стабильность** определяется устойчивостью частиц дисперсной фазы к седиментации, которая зависит от дисперсности и разности плотностей топлива и воды.

**Агрегативная стабильность** характеризуется устойчивостью частиц дисперсной фазы к коалесценции и определяется наличием эмульгаторов, которые образуют на поверхности капелек воды молекулярный слой, предотвращающий их слияние. Эмульсии типа дизельное топливо — вода обладают низкой кинетической стабильностью. Расслоение ВТЭ происходит за несколько часов. Агрегативная стабильность эмульсии выше. При подогреве ВТЭ до 50 °С агрегативная стабильность снижается. Низкие же температуры, наоборот, не оказывают на стабильность эмульсии заметного влияния.

**Дисперсность ВТЭ** определяется размерами капелек дисперсной фазы (воды). Чем меньше размеры капелек воды и чем они однороднее, тем равномернее распределяются частицы топлива в воде, тем выше кинетическая стабильность эмульсии. Дисперсность зависит от плотности, вязкости, поверхностного соотношения, способа и продолжительности диспергирования. Средний диаметр дисперсной фазы может меняться в пределах от 4 до 20 мкм.

Ведутся работы по созданию высокостабильных ВТЭ на основе подбора высокоэффективных диспергаторов и стабилизаторов с размером частиц от 1 до 3 мкм, что позволяет создавать высококонцентрированные ВТЭ с содержанием воды до 50...55 % [27]. С увеличением содержания воды в ВТЭ плотность и вязкость возрастают, поверхностное натяжение увеличивается, температура застывания и вспышки повышается, теплотворная способность снижается, показатели токсичности и дымности дизелей улучшаются.

Установки для получения ВТЭ должны быть просты и надежны. Для этой цели применяются механические мешалки, коллоидные мельницы, струйные диспергаторы, барботажные установки, ультразвуковые и кавитационные установки, гомогенизаторы. Каждая из перечисленных установок позволяет получить ВТЭ достаточной дисперсности, хотя размеры частиц различны. Так, коллоидные мельницы приготавли-

вают эмульсии размером 3...4 мкм, механические мешалки — 12...18, гомогенизаторы — 1 мкм и меньше.

Вода оказывает сложное воздействие на процессы смесеобразования и сгорания топлива. Температура кипения мазута при нормальном давлении 260...300 °С, а воды 100 °С. Разница между температурой поверхности топлива и температурой кипения воды, находящейся внутри нее, составляет (с учетом испарения с поверхности капли) 70...200 °С. Другими словами, вода начинает кипеть раньше, чем топливо. Микрочастицы воды, превращаясь в парообразное состояние, образуют паровые пузырьки. Пленка топлива, постоянно испаряясь, становится тоньше. Наступает момент, когда пары воды разрушают поверхность капли, т. е. наступит микроразрыв. Капля дробится, ее частицы интенсивно испаряются и перемешиваются. Кроме этого, микроструи от выбросов паров воды создают за счет диффузии и увеличивают турбулентное перемешивание частиц капли в струе распыленного топлива. Благодаря этому процесс сгорания топлива становится более совершенным.

При работе дизелей на ВТЭ дымность ОГ уменьшается в результате влияния водяных паров на процесс газификации углерода (сажи). Выгорание сажистых остатков топлива занимает 30...40 % общего времени горения капли топлива. Они обычно не успевают выгорать, но в присутствии паров воды в достаточном количестве реагируют с ними с образованием углекислого газа и водорода. По Зельдовичу Я. Б., скорость образования окиси углерода пропорциональна концентрации водяных паров. Вода снижает температуру в конце сжатия и среднюю температуру цикла, что сказывается на кинетике процессов образования оксидов азота, да и всех химических процессов в целом. При увеличении содержания воды в ВТЭ снижается средняя температура цикла и соответственно содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ.

Вода разбавляет горючую смесь, уменьшая тем самым относительную концентрацию кислорода, что также благоприятно влияет на снижение  $\text{NO}_x$  в ОГ.

На рисунке 32, а представлена схема дозирования компонентов и приготовления ВТЭ высокой концентрации, а на рисунке 32, б — результаты изменения параметров дизеля 1ЧН 16/17 в зависимости от содержания воды в ВТЭ [27] (для приготовления ВТЭ применялся механический диспергатор с частотой вращения 2000...3000  $\text{мин}^{-1}$ ). Благодаря применению эффективных стабилизаторов удалось получить эмульсии с агрегативной стабильностью до 50 сут, кинетической — до двух сут. Из рисунка 32, а видно, что для каждого режима характерно собственное оптимальное количество воды в ВТЭ. При большем содержании воды наблюдалась неустойчивая работа дизеля. При содержании воды до 40...45 % по массе в ВТЭ удается обеспечить снижение содержания в отработавших газах  $\text{CO}$  в 5...8 раз, сажи — более чем в

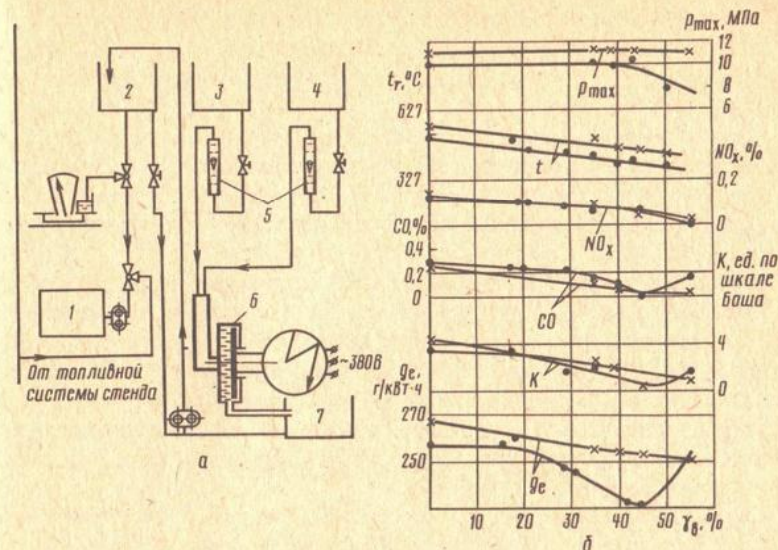


Рис. 32. Применение ВТЭ:

а — схема дозирования компонентов и приготовления ВТЭ: 1 — дизель; 2, 3, 4 и 7 — баки эмульсии, топливный, воды, промежуточный; 5 — ротаметр; 6 — диспергатор; б — изменение параметров дизеля 1ЧН 16/17 в зависимости от содержания воды в ВТЭ: ● —  $p_e = 43,7 \text{ кВт}$ ;  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ; × —  $p_e = 59 \text{ кВт}$ ;  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

10 раз,  $\text{NO}_x$  — в 6...8 раз; удельный эффективный расход топлива снижается на 15...18  $\text{г/кВт} \cdot \text{ч}$ .

Высокую эффективность применения высококонцентрированных ВТЭ объясняют существенным улучшением процессов смесеобразования и сгорания топлива в присутствии равномерно распределенных по смеси паров воды. Анализ диаграмм тепловыделения показывает, что, несмотря на увеличение почти в 1,5 раза времени подачи топлива и увеличение периода задержки воспламенения, время сгорания топлива меньше на 25...30 град п. к. в. Резкое уменьшение продуктов неполного сгорания подтверждает отсутствие догорания топлива. Снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ связано со снижением на 200...300° максимальной температуры в КС. Термометрирование поршня при работе дизеля на ВТЭ с содержанием воды, равным 50 %, показало снижение средней температуры в районе первого поршневого кольца на 10...15°. Все это приводит к повышению надежности деталей ЦПГ.

**Подача воды во впускной трубопровод.** При подаче воды во впускной трубопровод дизеля достигнуты лучшие показатели, особенно по снижению  $\text{NO}_x$  в ОГ, чем при применении ВТЭ с содержанием воды 10...30 %. Это объясняется в первую очередь тем, что при этом методе возможна подача воды в 2, 3 и более раз. превышающая подачу ДТ.

Вместе с тем этот метод требует лишь установки карбюратора, дополнительного бака для воды и при необходимости системы регулирования. Он может с успехом применяться на уже эксплуатируемых дизелях [28].

Подача воды во впускной трубопровод также оказывает воздействие на процесс горения углеводородных топлив. При таком способе в рабочем цикле дизеля отводится достаточное количество времени на процессы нагрева частиц воды от деталей ЦПГ, ее испарение, участие в процессе сжатия.

В отличие от работы дизеля на ВТЭ, при подаче воды во впускной трубопровод к моменту подачи ДТ в цилиндре находится хорошо испаренная, нагретая до высокой температуры и сжатия смесь воздуха с парами воды. Вода при таких условиях диссоциирует на активные радикалы ОН и Н. Именно эти радикалы играют значительную роль в инициировании процессов горения, увеличивая концентрацию активных центров и влияя на кинетику химических превращений промежуточных продуктов окисления.

Снижение температуры впускного заряда у дизелей с подачей воды во впускной трубопровод, вызванное потерей части теплоты на испарение воды, сказывается на протекании всего рабочего цикла, динамике тепловыделения и должно вызывать снижение мощностных и экономических показателей. Однако экспериментальные данные [28] показывают, что подача воды не снижает мощность дизеля даже при значительных ее количествах. Это объясняется тем, что увеличение количества активных радикалов ОН и Н при подаче воды на впуске приводит к увеличению скорости разветвленной цепной реакции, т. е. способствует окислению углеводородного топлива, причем эта активность возрастает при увеличении температуры. Возросшее число диссоциированных молекул воды существенно инициирует процесс сгорания, кроме того, пары воды, образуемые как продукты горения, продолжают концентрацию активных центров, влияют на кинетику превращения промежуточных активных центров, на кинетику превращения промежуточных продуктов окисления и ход реакции с участием стенки цилиндра, что не может не влиять на образование токсичных компонентов в ОГ.

Индикаторное исследование тракторного дизеля Д-21А1 (2С10, 5/12) [28] показало, что при подаче воды до 100 % к расходу ДТ не изменяется период задержки воспламенения (рис. 33), характер кривой давления и максимальное давление газов в цилиндре также не изменяются. Вместе с тем из результатов обработки индикаторных диаграмм (рис. 34) видно, что кривые динамики тепловыделения, средней температуры газов в цилиндре, скорости отвода теплоты вследствие теплоотдачи в стенки цилиндра и полезного выделения теплоты при подаче воды до 100 % к расходу основного топлива лежат ниже аналогичных кривых дизельного процесса. Такое расхождение в экспериментальных данных можно объяснить увеличением скорости разветвленной цепной реакции за счет

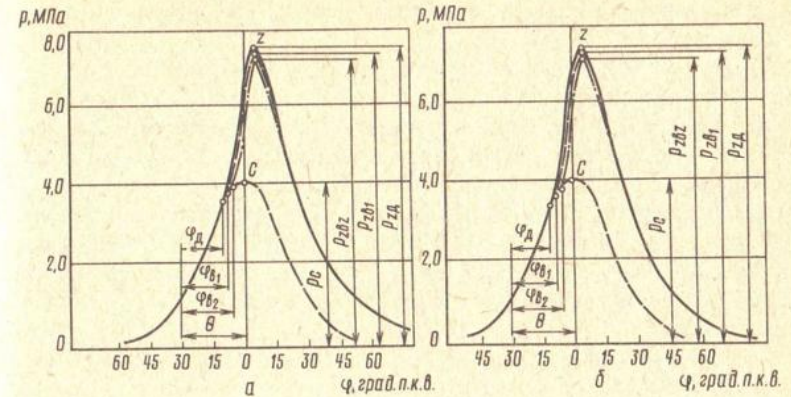


Рис. 33. Индикаторные диаграммы дизеля Д-21А1:

$a$  — при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $b$  — при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — — дизельный процесс; - - - - - подача 150% к расходу основного топлива; - · - · - · - подача 200% воды к расходу основного топлива

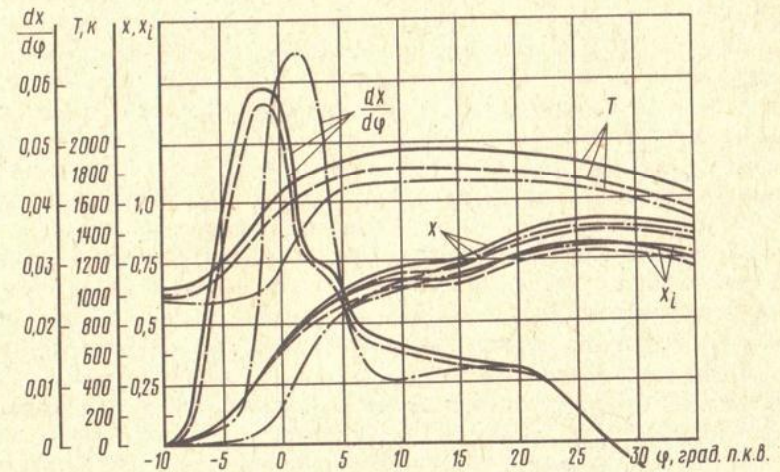


Рис. 34. Графики динамики выделения теплоты  $dx$ , усредненной температуры газов в цилиндре  $T$ , скорости отвода теплоты вследствие теплоотдачи в стенки цилиндра  $x$  и полезного выделения теплоты  $x_i$  в функции угла поворота коленчатого вала для  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

— — — — дизельный процесс; - - - - - подача 100% воды к расходу основного топлива; - · - · - · - подача 200% воды к расходу основного топлива

иницирования процесса сгорания углеводородного топлива при возросшем числе диссоциированных молекул воды, подаваемой на впуске дизеля.

Из графиков на рисунке 34 видно, что  $(dx/d\phi)_{\max}$  дизельного процесса несколько выше  $(dx/d\phi)_{\max}$  с подачей воды до 100%. При увеличении подачи воды до 200% к расходу основного топлива  $(dx/d\phi)_{\max}$  значительно возрастает по сравнению с дизельным процессом и сдвигается вправо от ВМТ, что объясняется значительным увеличением угла, соответствующего периоду задержки воспламенения, при увеличении количества подаваемой воды на впуске более 100% к расходу основного топлива. При подаче воды наблюдается значительное снижение средней температуры газов в цилиндре. При  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и дизельном процессе  $T_{\max} = 1937 \text{ К}$ , при подаче 100% воды  $T_{\max} = 1743 \text{ К}$ . Снижение температуры газов в цилиндре объясняется в первую очередь потерями на нагрев и испарение воды, снижением температуры стенок цилиндра.

Таким образом, подача воды более 100% к расходу основного топлива приводит к тому, что возможности ее испарения (при данной температуре и давлении во впускном трубопроводе) исчерпываются и часть воды в виде капель попадает в цилиндры дизеля, отнимая теплоту у стенок цилиндра, ухудшая условия горения ДТ в присутствии влаги.

Из анализа индикаторных диаграмм (см. рис. 33) становится очевидным, что оптимальные подачи воды на впуске дизелей должны составлять 50...100% к расходу ДТ. Снижение температуры газов в цилиндре, стенках цилиндров не может не отразиться на процессе образования  $\text{NO}_x$ , имеющих термическую природу, поскольку содержание  $\text{NO}_x$  (в основном  $\text{NO}$ ) растет в зависимости от температуры по экспоненциальной зависимости. Для гетерогенного горения, наблюдающегося в цилиндрах дизеля, существенное значение приобретает распределение зон горения во времени и в пространстве объема цилиндра, а также процессы массо- и теплопереноса, определяющие граничные условия для зон локального горения паров топлива и тем самым процессы образования и "закалки"  $\text{NO}_x$  в цилиндре.

Зависимость содержания  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}$  в функции расхода воды при подаче ее во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 представлена на рисунке 35, а. Количество подаваемой воды изменялось от 0 до 200% ( $G_B/G_T = 2,0$ ).

Наиболее существенное влияние подача воды оказывает на содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ. Снижение содержания  $\text{NO}_x$  при подаче 100 и 200% воды к расходу ДТ составляет в 2 и в 4 раза соответственно по сравнению с дизельным процессом при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ ; при  $2000 \text{ мин}^{-1}$  закономерность снижения  $\text{NO}_x$  в ОГ с увеличением количества подаваемой воды также сохраняется. При этом наблюдается незначительный рост  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{C}$ . Влияние подачи воды в цилиндры дизеля сказывается на содержании  $\text{NO}_x$  в ОГ во всем диапазоне нагру-

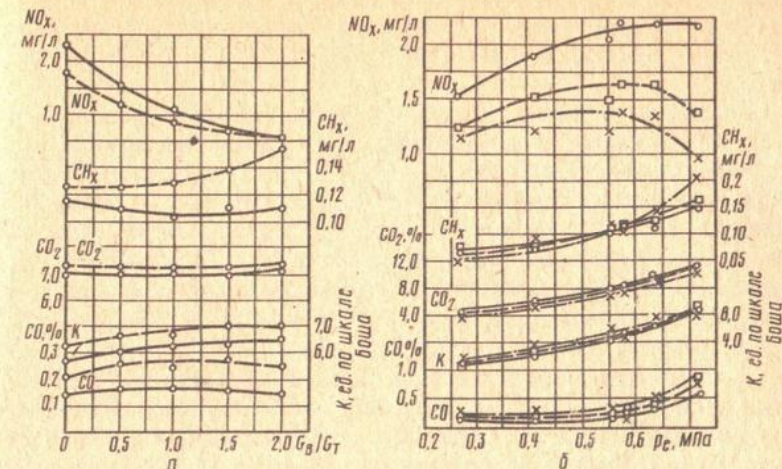


Рис. 35. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 в зависимости:

а — от расхода воды: ————  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; - - - - -  $2000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
б — от нагрузки при подаче воды на впуске при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :  
— — — — — дизельный процесс;  
- - - - - с подачей воды 50% к расходу основного топлива;  
- - - - - с подачей 100% воды к расходу основного топлива; а — от частоты вращения при подаче воды на впуске: ———— дизельный процесс; - - - - - с подачей 50% воды к расходу основного топлива; - - - - - с подачей 100% воды к расходу основного топлива

зок, что видно из графика содержания токсичных компонентов при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  в зависимости от нагрузки (рис. 35, б). При увеличении количества подаваемой воды на впуске содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ заметно снижается. Анализ результатов показывает, что основное количество  $\text{NO}_x$  образуется в цилиндре дизеля в период так называемого быстрого сгорания, что во многом определяет место и время их образования. Образование  $\text{NO}_x$  на малых нагрузках дизеля при средней максимальной температуре цикла менее  $1300...1500 \text{ }^\circ\text{C}$  связано с наличием повышенных локальных температур в области сгорания капелек топлива. Наличие локальных температур, выравнивающихся по объему цилиндра со скоростью звука в областях гетерогенного сгорания, и определяет уровень образования  $\text{NO}_x$  на малых нагрузках. Дальнейшее повышение

содержания  $\text{NO}_x$  по мере возрастания нагрузки до средних связано с увеличением локальных температур и особенно с временем их существования.

При работе дизеля на нагрузках, близких к максимальным, образование  $\text{NO}_x$  сокращается вследствие возрастающего дефицита кислорода при изменении  $\alpha$ . При подаче воды в цилиндры дизеля средняя температура цикла снижается на  $200^\circ\text{C}$ . Это вызывает снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ на всех нагрузках, хотя характер кривых  $\text{NO}_x$  в целом остается без изменения. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 в зависимости от частоты вращения при подаче воды на впуске представлено на рисунке 35, в, из которого видно, что количество подаваемой воды на впуске снижает  $\text{NO}_x$  в ОГ во всем диапазоне частот вращения, причем наибольший эффект наблюдается на малых частотах вращения ( $1200\text{...}1400\text{ мин}^{-1}$ ). При увеличении частоты вращения эффект от подачи воды уменьшается. Снижение температуры стенок цилиндра, температуры холодного пристеночного слоя приводит к дополнительному образованию  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ . Анализ мощностных и экономических показателей работы дизеля Д-21А1 при подаче воды во впускной трубопровод показывает, что температура ОГ снижается на  $20\text{...}40^\circ$ , снижаются коэффициенты  $\eta$  и  $\alpha$ . Мощностные показатели остаются на уровне дизельного процесса.

Технические вопросы по созданию конструкции для подачи воды во впускной трубопровод могут решаться различными путями с учетом поставленных задач, а также количества подаваемой воды и необходимости создания специальных устройств, позволяющих регулировать подачу воды в зависимости от температуры двигателя и других показателей.

Авторами предложены как простейшая система подачи воды с помощью беспоплавкового карбюратора (рис. 36, а) для дизеля Д-21А1 трактора Т-25А, так и усовершенствованная конструкция, включающая устройства, прекращающие подачу воды в карбюратор при понижении температуры охлаждающей жидкости ниже допустимой, а также осуществляющие автоматическое включение и выключение уст-

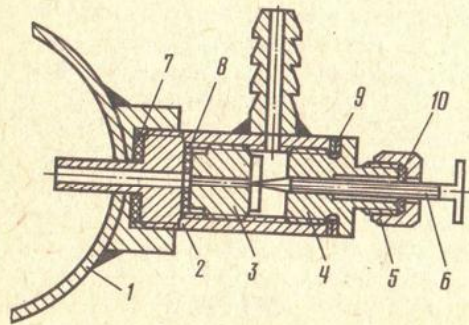


Рис. 36. Схема беспоплавкового карбюратора для подачи воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 трактора Т-25А:

1 - впускной трубопровод; 2 - корпус; 3 - жиклер; 4 - корпус регулировочной иглы; 5 - гайка сальника регулировочной иглы; 6 - регулировочная иглы; 7, 8 и 9 - уплотнительные прокладки; 10 - сальник регулировочной иглы

ройства при пуске и остановке дизеля ЯМЗ-240 самосвала БелАЗ-540А. Обе системы прошли эксплуатационные испытания [28].

Система с беспоплавковым карбюратором включается в работу после прогрева двигателя. Регулировочной иглой 6 (рис. 36) устанавливается расход воды, равный часовому расходу топлива. Дальнейшая работа заключается в подключении карбюратора к баку для воды в начале работы и отключения в конце работы за  $10\text{...}15$  мин до остановки двигателя. Представляют интерес данные по снижению содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля Д-21А1 с системой подачи воды во впускной трубопровод при эксплуатации на животноводческом комплексе. Замеры производились в воздухе рабочей зоны коровника, в зоне выброса ОГ трактора на расстоянии  $1,5$  м от обреза выпускной трубы. Воздух анализировался на содержание  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  экспресс-методом. Пробы воздуха определялись до прохода трактора, при работе трактора по дизельному процессу и при работе с подачей воды на впуске. Из результатов эксперимента, представленных в таблице 20, видно, что еще до прохода трактора в воздухе животноводческой фермы находится значительное количество  $\text{NO}_x$ . После прохода трактора содержание  $\text{NO}_x$  резко возрастает. После прохода трактора с подачей воды на впуске содержание  $\text{NO}_x$  в воздухе рабочей зоны снижается на  $13\text{...}40\%$ , содержание  $\text{CO}$  остается на том же уровне.

20. Влияние подачи воды во впускной трубопровод трактора Т-25А на загрязнение атмосферы ( $\text{мг/м}^3$ ) при эксплуатации его на животноводческом комплексе

| Условия опыта                                   | Компоненты    | Точки замеров |      |       |       |       |
|---|---------------|---------------|------|-------|-------|-------|
|   |               | 1             | 2    | 3     | 4     | 5     |
| До прохода трактора                             | $\text{NO}_x$ | 3,1           | 2,7  | 2,05  | 2,05  | 2,25  |
|   | $\text{CO}$   | —             | —    | —     | —     | —     |
| После прохода трактора                          | $\text{NO}_x$ | 30,8          | 41,0 | 36,95 | 36,95 | 32,85 |
|   | $\text{CO}$   | 43,7          | 35,0 | 43,7  | 25,0  | 43,7  |
| После прохода трактора с подачей воды на впуске | $\text{NO}_x$ | 22,55         | 30,8 | 22,55 | 22,55 | 28,7  |
|   | $\text{CO}$   | 43,7          | 43,7 | 43,7  | 25,0  | 43,7  |

Система, предназначенная для дизеля ЯМЗ-240 автосамосвала БелАЗ-540А, состоит из следующих основных элементов (рис. 37): термостатического устройства, вакуумного автомата, карбюратора. Система работает следующим образом. Вода из водяного бака после прохождения термостатического устройства 23 и вакуумного автомата 14 с помощью карбюратора 8 подается в дополнительный трубопровод 9, из которого она поступает во впускной трубопровод 12 дизеля 33. Воздух, поступающий в дизель из впускного трубопровода 12, очищается от пыли и частиц в штатном воздухоочистителе 1, а часть воздушного потока, проходящего в дополнительный трубо-

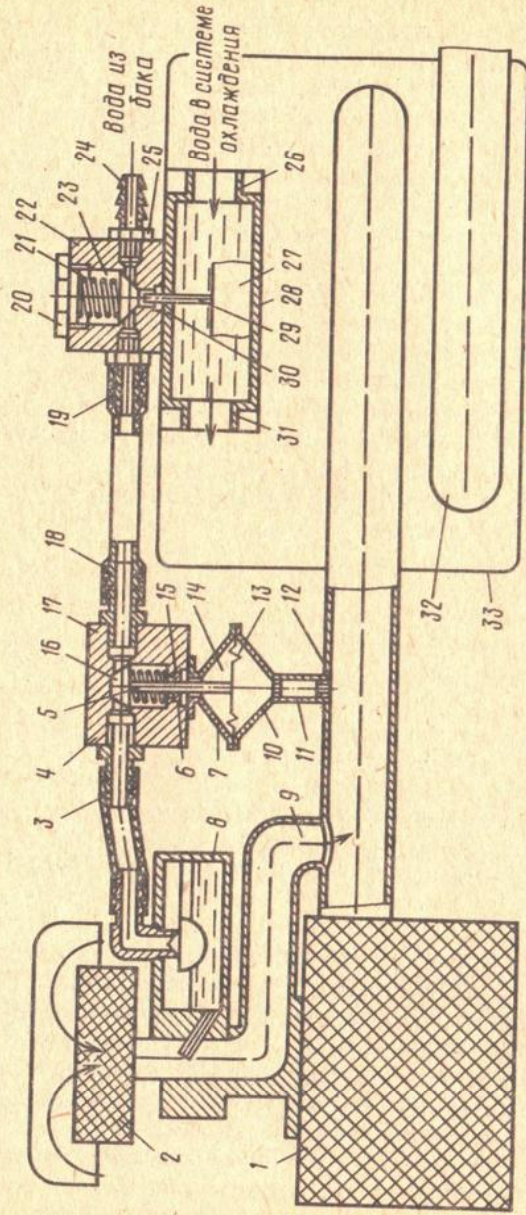


Рис. 37. Схема системы подачи воды во впускной трубопровод дизеля ЯМЗ-240 самосвала БелАЗ-540А:

1 — воздухоочиститель; 2 — воздушный фильтр; 3, 18, 19 и 24 — штуцера; 4 и 21 — пружины; 5 и 29 — штоки; 6 и 30 — сальники; 7, 26 и 31 — отверстия; 8 — карбюратор; 9 — дополнительный трубопровод; 10, 17, 22 и 28 — корпус; 11 — трубка; 12 — впускной трубопровод; 13 — мембрана; 14 — вакуумный автомат; 15 — уплотнение; 16 и 25 — клапаны; 20 — болт; 23 — термостатическое устройство; 27 — термостат; 32 — впускной трубопровод; 33 — дизель

провод 9 через карбюратор 8, очищается в дополнительном воздушном фильтре 2.

Термостатическое устройство работает следующим образом. Вода из системы охлаждения дизеля поступает через отверстие 26 в корпусе 28, омывает термостат 27, который выполнен в виде гофрированной оболочки, заполненной рабочей жидкостью с большим коэффициентом линейного расширения, и выходит из корпуса через отверстие 31. При падении температуры воды в системе охлаждения ниже минимально допустимой объем рабочей жидкости термостата 27 уменьшается и шток 29 термостата занимает крайнее нижнее положение. В результате клапан 25 под действием пружины 21, поджатой болтом 20, прижимается к седлу отверстия, связывающего штуцера 19 и 24, прекращая тем самым поступление воды из бака в карбюратор 8. Сальник 30 предотвращает возможность поступления воды из системы охлаждения двигателя в корпус 22. При повышении температуры воды в системе охлаждения рабочая жидкость термостата 27 расширяется, поднимает оболочку термостата, а с ней и шток 29, который, преодолевая сопротивление пружины 21, поднимает клапан 25, открывая отверстие, связывающее штуцера 19 и 24. Вода вновь поступает из бака в карбюратор 8. При дальнейшем повышении температуры воды соответственно возрастает объем жидкости термостата 27 и под действием штока 29 клапана 25, поднимаясь, увеличивает проходное сечение отверстия. Такая регулировка количества подаваемой воды позволяет существенно стабилизировать температурный режим дизеля независимо от ездового цикла, что повышает его долговечность.

Вакуумный автомат работает следующим образом. При неработающем дизеле 33 во впускном трубопроводе 12, а следовательно, и под мембраной 13 в корпусе 10 устанавливается атмосферное давление. Верхняя полость корпуса 10 над мембраной 13 связана с атмосферой отверстием 7 и герметизируется от воды, проходящей через штуцера 18 и 3, уплотнением 15 в виде сальника 6. В нижней полости корпуса 10 под мембраной 13 создается разрежение за счет связи этой полости (через трубку 11) с впускным трубопроводом 12. При этом положении мембрана находится в равновесном состоянии, а клапан 16 в корпусе 17 прижат пружиной 4 к седлу отверстия, связывающего штуцера 18 и 3. В результате вода из термостатического устройства 23 не поступает в карбюратор 8. При пуске двигателя во впускном трубопроводе создается разрежение и мембрана 13 вследствие разности давлений (атмосферное над мембраной и разрежение под ней) опускается вниз. При этом усилие от мембраны 13 с помощью штока 5 передается на пружину 4, в результате чего пружина сжимается, а клапан 16 опускается, открывая магистраль подачи воды в карбюратор. При остановке двигателя давление под мембраной и над ней выравнивается, мембрана занимает нейтральное положение, а клапан 16 под действием пружины 4 вновь закрывает отверстие, связывающее штуцера 18 и 3. Подача воды

из бака в поплавковую камеру карбюратора прекращается. Таким образом, вакуумный автомат включает и выключает систему подачи воды, исключает участие водителя в управлении системой, облегчая условия его работы, а также исключает возможность попадания воды в цилиндры неработающего дизеля.

Результаты эксплуатационных испытаний системы подачи воды во впускной трубопровод дизеля ЯМЗ-240 автомобиля БелАЗ-540А при подаче 30...40 % воды по массе и ее влияние на снижение  $NO_x$  в ОГ по относительному времени ездки представлены на рисунке 38. При подаче воды на впуске температура ОГ снижается на 20...50°, а выделение  $NO_x$  уменьшается в среднем на 30 %. Нароботка пяти автосамосвалов с системой подачи воды составила от 5 000 до 20 000 км пробега. Проведенный на трех двигателях микрометраж деталей ЦПГ при пробеге от 12 000 до 20 000 км ухудшение долговечности не выявил. Вместе с тем нагарообразование в цилиндрах уменьшилось в 2...3 раза.

Практически такие же результаты получены при эксплуатационных испытаниях на износ деталей ЦПГ тракторов Т-25А с системой подачи воды. Результаты спектрального анализа картерного масла дизелей при работе с подачей воды на впуске и без нее представлены на рисунке 39, а. Из графиков видно, что подача воды влияет на содержание продуктов изнашивания в масле. Для Fe разница уже при 60 моточасах составляет между дизельным процессом и работой с подачей воды на впуске около  $5 \cdot 10^3$  мкг/кг. В дальнейшем эта разница составляет  $(7...7,5) \cdot 10^3$  мкг/кг и сохраняется до конца 240-часового цикла. Для такого элемента, как Si, разность содержания в масле при работе по дизельному процессу и с подачей воды на впуске составляет к концу 240-часового цикла  $(6...6,2) \cdot 10^3$  мкг/кг. Для Cu, Al и Cr содержание в масле при работе с подачей воды на впуске увеличивается не более чем на  $(2...3,2) \cdot 10^3$  мкг/кг. Физико-химический анализ картерного масла показал, что температура вспышки, кинематическая вяз-

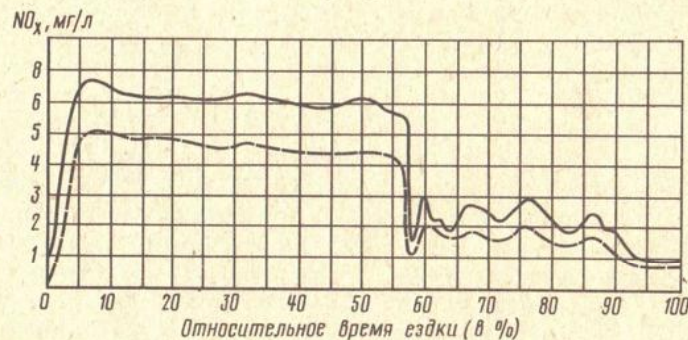


Рис. 38. Содержание  $NO_x$  в ОГ дизеля ЯМЗ-240 автомобиля БелАЗ-540А при эксплуатационных испытаниях:

— без подачи воды; - - - с подачей воды

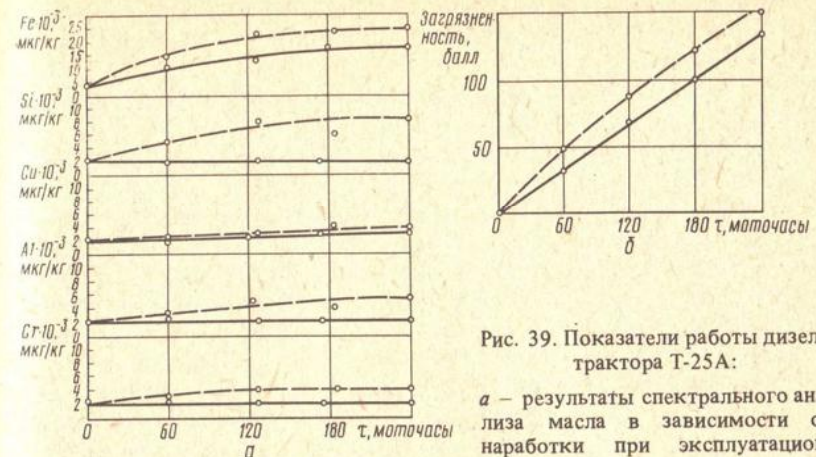


Рис. 39. Показатели работы дизеля трактора Т-25А:

а — результаты спектрального анализа масла в зависимости от наработки при эксплуатацион-

ных испытаниях: о — дизельный процесс; - - - с подачей воды на впуске; б — загрязненность масла при работе: — дизельный процесс; - - - с подачей воды на впуске

ность в период испытаний не изменялись. Загрязненность масла при работе дизеля с подачей воды в зависимости от наработки представлена на рисунке 39, б. При наработке 240 моточасов загрязненность масла дизеля, работающего с подачей воды на впуске, выше на 20...25 баллов, чем у контрольного дизеля. Разборка дизеля через 240 моточасов показала, что если днища поршней дизеля, работающего с подачей воды на впуске, покрыты равномерным тонким слоем сажистых отклонений, то днища поршней контрольного дизеля покрыты нагаром средней твердости. На головках цилиндров, верхних поясах гильз у дизеля, работающего с подачей воды на впуске, количество нагара также меньше. Масса нагара на комплекте поршней дизеля с подачей воды на впуске составила 4,0 г, а у контрольного дизеля — 8,4 г, т. е. снизилась более чем в 2 раза.

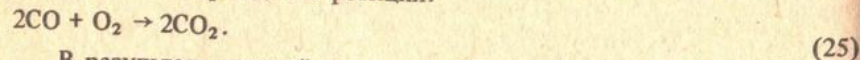
## 7. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

### 7.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Для снижения токсичности ОГ в выпускной системе автотракторных дизелей дополнительно устанавливают технические средства, обеспечивающие их физико-химическую очистку. Наиболее перспективным для этого является применение каталитических, термических и жидкостных нейтрализаторов, фильтров, а также систем и средств снижения токсичности, изложенных ранее в главах 5 и 6.

Нейтрализаторы, фильтры и системы рециркуляции ОГ позволяют без значительных изменений конструкции дизелей обеспечивать эффективную очистку ОГ.

**Термические нейтрализаторы** относятся к типу окислительных устройств, в которых за счет избытка кислорода, имеющегося в ОГ дизелей, осуществляется сгорание продуктов неполного сгорания топлива, поступающих в систему выпуска из цилиндров. Для догорания  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{RCHO}$  и других продуктов неполного сгорания до конечных безвредных продуктов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в термическом нейтрализаторе устанавливают реакционную камеру, температура ОГ в которой должна быть  $650\text{--}850^\circ\text{C}$ . Указанная температура ОГ поддерживается в нейтрализаторе как за счет теплоты самих ОГ (в том числе в результате процесса сгорания, идущего с выделением теплоты), так и за счет дополнительного подвода теплоты от постороннего источника. В дизелях для сгорания  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{RCHO}$  и других горючих веществ используется кислород, содержащийся в ОГ. Типичные уровни температур, необходимых для обеспечения процесса сгорания в реакционной камере, показаны на рисунке 40. Для окисления  $\text{CO}$  требуются более высокие температуры, чем для окисления  $\text{CH}_x$ . Эффективность процесса сгорания вредных веществ в термическом нейтрализаторе определяется его рабочей температурой, величиной избыточного кислорода в ОГ, интенсивностью перемешивания ОГ в реакционной камере и ее объемом. Сущность каталитической очистки ОГ заключается в беспламенном окислении продуктов неполного сгорания топлива, содержащихся в ОГ, на поверхности катализатора, размещаемого в реакторе каталитического нейтрализатора. Так, догорание  $\text{CO}$  на поверхности катализатора идет по реакции:



В результате реакций догорания  $\text{CO}$  и продуктов неполного сгорания топлива (как в случае очистки ОГ с помощью термических нейтрализаторов) образуются конечные безвредные продукты сгорания —  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Перечисленные реакции являются окислительными, эффективность их в определяющей степени зависит от температуры ОГ (см. рис. 40).

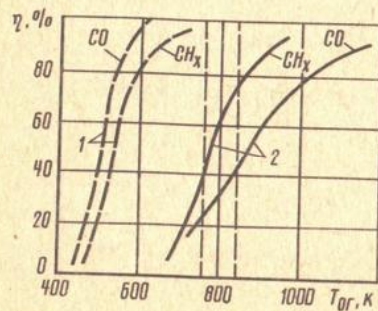


Рис. 40. Сравнения окисления  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$  каталитическим и термическим нейтрализаторами:

1 — каталитический нейтрализатор; 2 — термический нейтрализатор

Существует несколько теорий, объясняющих процесс гетерогенного катализа (теории промежуточных соединений, активных центров и активных ансамблей, мультиплетная, электронная и др.). Важная роль для катализа в большинстве этих теорий отводится активным центрам — неоднородным участкам поверхности катализатора, обладающим повышенной активностью. Для всех теорий катализа общим является образование промежуточного соединения адсорбционного типа на поверхности катализатора.

**Каталитический гетерогенный процесс окисления  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{RCHO}$**  можно представить в виде пяти отдельных стадий, условно проходящих в такой последовательности: диффузия  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{RCHO}$  из потока ОГ к поверхности зерна катализатора и внутри его пор, имеющих в зерне; активная адсорбция  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{RCHO}$  (хемосорбция) на поверхности катализатора с образованием промежуточных поверхностных соединений реагент — катализатор; перегруппировка атомов исходных компонентов ОГ с образованием промежуточного соединения продукт — катализатор; десорбция продукта ОГ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) с поверхности катализатора внутри пор и от поверхности зерна в общий поток ОГ.

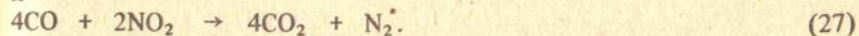
Общая скорость суммарного каталитического процесса лимитируется самой медленной стадией.

В соответствии с представлениями, развитыми Франк-Каменецким, в переходной области работы катализатора зависимость его эффективности от температуры газа при фиксированной объемной скорости имеет вид S-образной кривой. Для получения высокой эффективности очистки ОГ от  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{RCHO}$  необходимо, чтобы процесс каталитической очистки дизельных ОГ проходил в области внешней диффузии, т. е. при температуре отработавших газов выше  $300^\circ\text{C}$ .

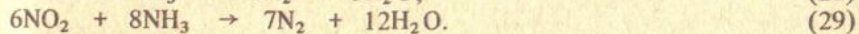
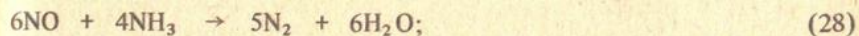
Для очистки ОГ дизелей от  $\text{NO}_x$  возможно применение восстановительных катализаторов. Селективное восстановление  $\text{NO}_x$  может происходить при добавлении в ОГ таких газообразных реагентов, как  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ , при использовании  $\text{CO}$  осуществляются реакции типа:



и

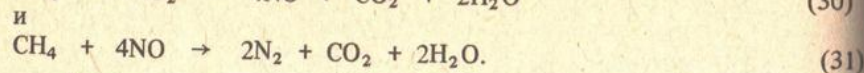
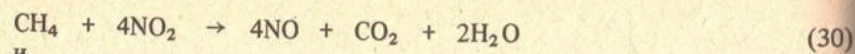


Восстановление  $\text{NO}$  аммиаком идет по реакциям, происходящим при  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ :



Возможно также неселективное восстановление  $\text{NO}_x$  за счет добавления в ОГ метана ( $\text{CH}_4$ ), протекающее при температуре ОГ  $350\text{--}450^\circ\text{C}$  по реакциям:





Недостатки перечисленных процессов восстановления  $\text{NO}_x$ : сложность регулирования относительно узкого диапазона температур ОГ, при которых осуществляются реакции восстановления, а также то, что непрореагировавшие  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  и другие добавки сами являются дополнительными загрязнителями атмосферы. При этой причине восстановительные процессы нашли очень ограниченное применение для очистки ОГ дизелей.

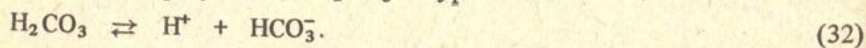
Отработавшие газы дизелей с точки зрения жидкостной очистки отдельных компонентов состоят из трех групп веществ: мелкодисперсных частиц (сажа, смолистые вещества, пары воды и т. д.), растворимых в воде компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{RCHO}$  и т. д.) и плохо растворимых и нерастворимых в воде компонентов ( $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и т. д.), что определяет диапазон действия жидкостных нейтрализаторов (ЖН), очищающих ОГ от  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ , сажи, смолистых веществ и  $\text{RCHO}$ . Углеводороды при низких температурах ОГ в определенных условиях конденсируются. Жидкостная очистка позволяет уменьшить токсичность дизеля, запах, слезоточивое действие и температуру ОГ. Очистка ОГ с помощью ЖН включает в себя три основных процесса: улавливание мелкодисперсных частиц; адсорбцию; конденсацию и фильтрацию.

Первая стадия — улавливание мелкодисперсных частиц — определяется жидкостью, которая поглощает эти частицы.

Второй стадией (адсорбцией) является процесс поглощения газовых компонентов ОГ жидкостью, в которой эти компоненты растворимы в той или иной степени. Скорость стадии определяется движущей силой процесса адсорбции (т. е. степенью отклонения системы от равновесного состояния), свойствами поглотителя, компонента и инертного газа, а также способом соприкосновения фаз (конструкцией ЖН и гидродинамическим режимом его работы).

Третья стадия — конденсация и фильтрация — наблюдается в ЖН при снижении температуры ОГ ниже критической температуры рассматриваемого компонента (в случае насыщенных паров этого компонента), коагуляции (слипания жидких и твердых частиц ОГ) и дальнейшего их задержания с помощью фильтров.

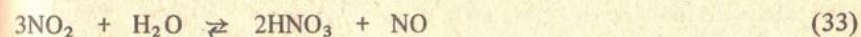
Рассмотрим реакции, по которым протекает поглощение основных токсичных компонентов ОГ. Растворение  $\text{CO}_2$  сопровождается диссоциацией образующейся  $\text{H}_2\text{CO}_3$  по уравнению:



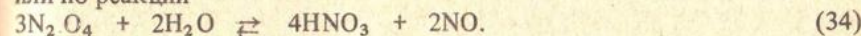
При растворении  $\text{CO}_2$  в растворах едких щелочей (МОН) наблюдается химическая абсорбция, которая протекает с большой скоростью

до тех пор, пока вся щелочь не перейдет в карбонат ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Поглотительная способность щелочного раствора по отношению к  $\text{CO}_2$  очень велика. Аналогично  $\text{SO}_2$  едкими щелочами (например,  $\text{NaOH}$ ) вначале образуется сульфат ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), а затем бисульфат ( $\text{NaHSO}_3$ ). Вместо едких щелочей в жидкостных нейтрализаторах иногда используются растворы карбонатов (например,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Заметное давление  $\text{SO}_2$  над раствором обнаруживается тогда, когда все основание переведено в сульфат и присутствуют ионы  $\text{HSO}_3^-$ .

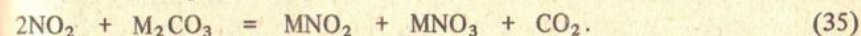
Взаимодействие  $\text{NO}_2$  и ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ) с водой протекает по реакции



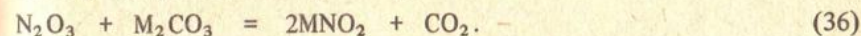
или по реакции



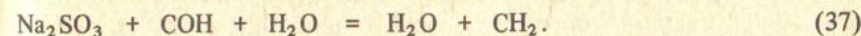
При адсорбции  $\text{NO}_2$  щелочами образуются эквимолекулярные количества нитрита и нитрата.



Эквимолекулярная смесь  $\text{NO} + \text{NO}_2$  ведет себя при абсорбции как  $\text{N}_2\text{O}_3$ , и реакция следует по уравнению:



Окись азота в воде практически нерастворима. Альдегиды достаточно хорошо растворяются в воде. Однако по мере насыщения растворимость их значительно снижается. Так, при концентрации альдегидов в воде 17...19 мг/л поглощается из ОГ 60...70 % альдегидов, а при концентрации их 750 мг/л поглощается только около 14 % альдегидов. Следовательно, хорошая их очистка обеспечивается только частой сменой воды. При растворении в воде сернистоокислого натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) и гидрохинона [ $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ ] поглотительная способность воды увеличивается, так как в этом случае идет реакция:



В этом растворе альдегиды ( $\text{RCOH}$ ) поглощаются до 90 %, а уменьшение поглотительной способности раствора с увеличением связанных альдегидов не так велико, как в чистой воде. Гидрохинон добавляют для увеличения срока действия сернистоокислого натрия в водном растворе из-за реакции его с кислородом воздуха.

В ЖН можно выделить не менее шести механизмов улавливания частиц: гравитационное оседание, центрифужное соударение, инерционное соударение, прямой захват, диффузия и электростатический механизм (будут рассмотрены при описании конструкций жидкостных нейтрализаторов).

Фильтрация — один из старейших способов, нашедший наибольшее применение для отделения частиц от газа-носителя. Фильтр обычно представляет собой пористую структуру из гранулированного или волокнистого материала, в котором осуществляется механическое отделение

твердых частиц (в основном сажи) от ОГ. Применяются фильтры, на поверхности которых осуществляется процесс сжигания сажи и других продуктов неполного сгорания. В них при температуре ОГ около 600 °С горение частиц происходит самопроизвольно. Реакция горения частиц в первом приближении состоит из трех стадий:

- подвод кислорода с ОГ и отвод газообразного продукта реакции;
- диффузия кислорода из потока ОГ к поверхности частиц;
- хемосорбция кислорода и реакция горения.

Температура ОГ порядка 600 °С нетипична для реальных условий эксплуатации автотракторных и комбайновых дизелей. Поэтому предложены многочисленные способы облегчения воспламенения частиц для обеспечения регенерации фильтров при недостаточно высокой температуре ОГ. Но при осуществлении этих способов встречаются серьезные трудности. В частности, дорог, ненадежен и требует сложной системы автоматического управления способ регенерации керамического фильтра путем предварительного нагрева ОГ с помощью топливной горелки; нанесение катализатора на поверхность фильтра для понижения температуры воспламенения частиц малоэффективно.

## 7.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ДИЗЕЛЕЙ

Пока еще не существует единого универсального средства, обеспечивающего достаточно полное снижение вредных выбросов с ОГ дизелей. Эта задача может быть решена только применением комплексных методов, включающих в себя малотоксичные рабочие процессы, методы воздействия на рабочий процесс дизеля, регулировки топливной аппаратуры, применение систем физико-химической очистки и комплексных методов.

В таблице 21 для методов и средств снижения токсичности и дымности ОГ приведены обобщенные данные по воздействию их на каждый из основных токсичных компонентов ОГ, уровень разработки методов и устройств, ограничений к применению и рекомендуемые области их применения.

Современное состояние работ по снижению токсичности и дымности ОГ дизелей характеризуется тем, что наиболее разработанными оказались каталитические и жидкостные нейтрализаторы, обеспечивающие определенное улучшение гигиенических характеристик дизелей. Это частично связано с тем, что правилами Госгортехнадзора при эксплуатации дизельного оборудования в условиях с ограниченным воздухообменом применение каталитических и жидкостных нейтрализаторов предусмотрено в обязательном порядке. В то же время применение этих устройств не обеспечивает снижения в ОГ дизелей NO<sub>x</sub>. Ряд адсорбентов (цеолиты) позволяет значительно очистить ОГ от NO<sub>x</sub>, однако для обеспечения процесса необходимо обезвоживание ОГ

21. Характеристики средств и методов снижения токсичности и дымности ОГ дизелей (У – уменьшение, В – увеличение, НВ – незначительное увеличение, НУ – незначительное уменьшение, У/2 и т. п. – уменьшение в 2 раза и т. п.; В/2 и т. п. – увеличение в 2 раза и т. п.; НИ – нет изменений, – нет сведений)

| Методы и средства снижения токсичности ОГ дизелей               | Токсичные компоненты ОГ |       |         |                 |      |                 |    | Экономичность* | Уровень разра-ботки | Ограниче-ния к при-менению | Рекомен-дуемые области приме-нения |               |
|---|-------------------------|-------|---------|-----------------|------|-----------------|----|----------------|---------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------|
|   | NO <sub>x</sub>         | С     | СО      | СН <sub>x</sub> | RHCO | SO <sub>x</sub> | БП |                |                     |                            |                                    | Запах         |
| <i>Малотоксичные рабочие процессы</i>                           |                         |       |         |                 |      |                 |    |                |                     |                            |                                    |               |
| Тип рабочего про-цесса (М, FM, H и т. д.)                       | У                       | У     | У       | У               | У    | У               | У  | У              | В                   | Внедрен                    | Не огра-ничен                      | Не огра-ничен |
| Разделенная каме-ра сгорания                                    | 2...4                   | 2...3 | 2       | У               | –    | НИ              | –  | У              | В                   | ”                          | ”                                  | ”             |
| Технологические особенности                                     | 2...3                   | 2...3 | 2...3   | 2...3           | –    | НИ              | –  | У              | НИ                  | ”                          | ”                                  | ”             |
| Совершенствова-ние систем впуска, выпуска топлив-ной аппаратуры | НИ                      | У     | У       | У               | –    | НИ              | –  | У              | НУ                  | ”                          | ”                                  | ”             |
| Степень сжатия, форма камеры сгорания                           | У                       | У     | У       | У               | НВ   | НИ              | –  | У              | В                   | Испыта-ния                 | –                                  | –             |
| Уменьшение мак-симальной цикло-вой подачи**                     | 1,3...2                 | 2     | 1,5...2 | 1,5...2         | –    | –               | –  | –              | –                   | –                          | –                                  | –             |
| Уменьшение угла опережения впрыскивания топлива                 | НИ                      | У     | У       | У               | В    | –               | –  | У              | НИ                  | Внедрен                    | Не огра-ничен                      | ”             |
|   | У                       | В     | НИ      | В               | –    | –               | –  | –              | В                   | ”                          | ”                                  | ”             |
|   | 1,5...2                 | 1,5   |         | 1,3             |      |                 |    |                |                     |                            |                                    |               |
| <i>Регулировка топливной аппаратуры</i>                         |                         |       |         |                 |      |                 |    |                |                     |                            |                                    |               |

| Методы и средства<br>ва снижения<br>токсичности ОГ<br>дизелей            | Токсичные компоненты |              |          |                 |      |                 |              |       |                                |   | Экономичность* | Уровень<br>разра-<br>ботки | Ограниче-<br>ния к при-<br>менению                           | Рекомен-<br>дуемые<br>области<br>приме-<br>нения |   |   |
|--|----------------------|--------------|----------|-----------------|------|-----------------|--------------|-------|--------------------------------|---|----------------|----------------------------|--|--|---|---|
|  | NO <sub>x</sub>      | С            | СО       | СН <sub>x</sub> | RHC0 | SO <sub>x</sub> | БП           | Запах | Воздействие на рабочий процесс |   |                |                            |  |  |   |   |
|  |                      |              |          |                 |      |                 |              |       | У                              | У |                |                            |  |  |   |   |
| Регулировка фаз<br>газораспределения                                     | У<br>1,2...1,5       | У            | У        | У               | -    | -               | -            | У     | -                              | - | У              | НВ                         | "  | "  | " |   |
| Регулировка па-<br>раметров топлив-<br>ной аппаратуры                    | НИ<br>1,5            | У<br>1,5     | У<br>1,5 | У<br>1,5        | -    | -               | -            | У     | -                              | - | У              | НИ                         | Не огра-<br>ничен  | "  | " |   |
| Рециркуляция ОГ  | У<br>2...5           | У            | У        | У               | У    | У               | У            | У     | У                              | У | У              | НВ                         | Отсутст-<br>вие надеж-<br>ных систем<br>управления           | "  | " |   |
| Впрыск воды, при-<br>менение водотоп-<br>ливных эмульсий                 | У<br>1,3...2         | У<br>1,3     | В<br>1,5 | В<br>1,3        | -    | -               | В<br>1,5...3 | -     | -                              | - | -              | НИ                         | Замерзание<br>воды при<br>ложитель-<br>ных тем-<br>пературах | При по-<br>ложитель-<br>ных тем-<br>пературах    | " | " |
| Надув***   | У<br>2               | У<br>2       | У<br>2   | У<br>2          | -    | -               | -            | У     | -                              | - | -              | НУ                         | Не огра-<br>ничен  | "  | " | " |
| Обогащение воз-<br>духа на впуске<br>жидким и газооб-<br>разным топливом | НУ<br>1,5...2        | У<br>1,5...2 | В<br>1,5 | В<br>1,5        | -    | -               | -            | У     | -                              | - | -              | У                          | Испы-<br>тания   | "  | " | " |
| Двойная топливо-<br>подача   | У<br>1,5...2         | У<br>1,5...2 | У<br>1,5 | У<br>1,5        | -    | -               | -            | У     | -                              | - | У              | НИ                         | "  | "  | " | " |

## Очистка отработавших газов

|   | У           | У            | НИ          | У            |             |             | У           | НИ | Внедрен | Ограниче-<br>ние при ра-<br>боте при<br>отрицатель-<br>ной темпе-<br>ратуре | При по-<br>ложитель-<br>ной темпе-<br>ратуре                                |  |
|---|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|----|---------|---|---|--|
|   |             |              |             | 2...3        | 2...5       | 2...10      |             |    |         |   |   | 2...10                                       |
| Жидкостный<br>нейтрализатор                           | У<br>1,1    | У<br>1,5...4 | НИ          | У<br>2...3   | У<br>2...5  | У<br>2...10 | У<br>2...10 | У  | НИ      | Внедрен   | Ограниче-<br>ние при ра-<br>боте при<br>отрицатель-<br>ной темпе-<br>ратуре | При по-<br>ложитель-<br>ной темпе-<br>ратуре |
| Каталитический<br>нейтрализатор                       | НИ          | У<br>1...1   | У<br>3...10 | У<br>НИ      | У<br>НИ     | У<br>3...10 | У<br>НИ     | У  | НИ      | "   | "   | "  |
| Фильтры   | НИ          | У<br>2...15  | НИ          | У<br>1,5...4 | У<br>2...15 | У<br>2...15 | У<br>2...15 | У  | НИ      | "   | "   | "  |
| Адсорберы   | У<br>2...15 | У<br>2...15  | -           | У<br>2...15  | У<br>2...15 | У<br>2...15 | У<br>2...15 | У  | НИ      | Испы-<br>тания  | "   | "  |
| Антидымные<br>присадки                                | НИ          | У<br>2...3   | НИ          | НИ           | НИ          | НИ          | НИ          | -  | НИ      | "   | "   | "  |
| Техническое об-<br>служивание и ре-<br>монт двигателя | НВ          | У<br>1,5     | У<br>1,5    | У<br>1,5     | У<br>1,5    | У<br>1,5    | У<br>1,5    | У  | НУ      | Внедрен   | "   | "  |
| Увеличение тем-<br>пературы впуске-<br>ного воздуха   | НВ          | У<br>1,4     | У<br>1,4    | У<br>1,4     | У<br>1,4    | У<br>1,4    | У<br>1,4    | У  | НУ      | "   | "   | "  |
| Увеличение тем-<br>пературы стенок<br>камеры сгорания | НВ          | У<br>1,4     | У<br>1,4    | У<br>1,4     | У<br>1,4    | У<br>1,4    | У<br>1,4    | У  | НУ      | "   | "   | "  |
| Использование<br>различных топлив                     | НУ          | У<br>1,5     | У<br>1,1    | У            | У           | У           | У           | У  | НИ      | "   | "   | "  |

\* Величина, обратно пропорциональная удельному расходу топлива.

\*\* Уменьшение мощности двигателя.

\*\*\* Надув с охлаждением воздуха или без заметного увеличения мощности двигателя.

и снижение их температуры до 20...30 °С. Для этого необходима установка в выпускной системе дизеля очень сложной, дорогой и металлоемкой системы, требующей проведения трудоемкого обслуживания. В результате применение цеолитов для очистки ОГ практического применения не нашло.

Поэтому наиболее эффективным является применение устройств, воздействующих на рабочий процесс. Указанные методы ориентировочно можно подразделить на три основных класса.

К первому из них следует отнести малотоксичные рабочие процессы за счет совершенствования формы КС, систем впуска и выпуска, создания новой топливной аппаратуры и на этой базе доводки рабочего процесса до уровня, обеспечивающего сочетание высоких экономических и мощностных показателей с низким выделением вредных выбросов ОГ в атмосферу.

Второй класс включает в себя разнообразные мероприятия, которые, не затрагивая основных конструктивных параметров двигателей, способствуют улучшению токсических свойств за счет воздействия на рабочий процесс посредством изменения либо свойств рабочего заряда, либо за счет некоторого отклонения регулировок от оптимальных по экономическим показателям двигателя.

К третьему классу можно отнести методы, применяемые в эксплуатационных условиях. Это в первую очередь применение антидымных присадок, соответствующее техническое обслуживание и ремонт дизелей, применение альтернативных топлив и масел и ряда других методов. Применение перечисленных мероприятий позволяет достигнуть низкой токсичности и дымности ОГ дизелей, находящихся в эксплуатации, и поддержания этого уровня токсичности и дымности ОГ в течение периода их эксплуатации.

### 7.3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ

Система снижения токсичности (ССТ) ОГ, а также их составные элементы, применяемые как самостоятельно, так и в составе системы, предназначаются для снижения уровня токсичности и дымности ОГ автотракторных дизелей. В общем случае они должны обеспечивать возможность эксплуатации техники с дизельным приводом в различных климатических зонах при температуре окружающей среды от +50 до -60 °С, относительной влажности от 20 до 100 % и при уклонах машин до 25° (кратковременно).

Противодавление, создаваемое выпускной системой двигателя, оснащенной ССТ, не должно, как правило, превышать показатель, заданный в паспорте на двигатель.

Ресурс ССТ и отдельных ее элементов при отсутствии механических повреждений и соблюдении правил эксплуатации должен быть не менее 40 000 км пробега машины или 2 000 моточасов наработки двигателя.

В лучшем случае они должны соответствовать ресурсу автомобиля или трактора.

Для общих условий установка ССТ не должна приводить к ухудшению основных технических характеристик трактора и автомобиля, она должна быть дешевой, относительно простой, иметь малые весогабаритные показатели. Для специальных условий допускается некоторое ухудшение перечисленных показателей, так как они не могут быть определяющими с точки зрения, например, производительности машины.

Наличие ССТ не должно оказывать значительного отрицательного воздействия на условия эксплуатации, срок службы двигателя, его деталей, элементов, топливной аппаратуры и других узлов двигателя.

При эксплуатации ССТ обязательно проведение ее технического обслуживания в соответствии с инструкцией по эксплуатации ССТ, а также обусловленное ее установкой на машине.

Конструкция всех элементов ССТ должна допускать осуществление контроля за их работой и обслуживание самой машины или трактора.

Установка ССТ на транспортном средстве не должна ухудшать условий техники безопасности и противопожарной безопасности, характерных для условий эксплуатации транспортного средства, что достигается, например, введением защитных экранов и ограждений.

Крепежные узлы, детали, фланцы и другие детали, применяемые в ССТ, должны быть унифицированы.

Система снижения токсичности не должна ухудшать обзор водителей, создавать препятствия для технического обслуживания и движения машины и трактора.

При разработке ССТ должны учитываться основные требования технической эстетики и эргономики.

В общем случае лимитная цена автомобиля или трактора, снабженных ССТ, не должна превышать исходную более чем на 5 %, а технико-экономические показатели транспортного средства — более чем на 3 %.

### 8. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ

**Термические нейтрализаторы.** Некоторые типы термических нейтрализаторов (дожигателей) позволяют снизить содержание таких токсичных компонентов ОГ, как  $\text{CH}_x$  и  $\text{CO}$ , до 90 %.

Термические нейтрализаторы и автомобили, оснащенные термическими дожигателями, обладают хорошими эксплуатационными качествами. Термические дожигатели могут быть долговечными, однако отсутствие места установки и особенности конструкции некоторых двигателей ограничивают их применение. Достигнуты успехи в области подбора материалов и конструкции внутреннего стержня (реактора) дожигателей.

Разработка термических дожигателей усложнена тем, что, как правило, для каждого трактора и автомобиля необходима разработка специального дожигателя. Исследования показали, что более эффективны конструкции дожигателей с увеличенными объемами. Альтернативным требованием является необходимость размещения дожигателя в подкапотном пространстве автомобиля, трактора, комбайна. Важный вопрос при разработке дожигателей — подбор материала, особенно для реакторов. Основное требование здесь — устойчивость материала к окислению и к температурам от 850 до 1000 °С, наблюдающимся в реакторе. Наиболее обещающими материалами в этом смысле являются нержавеющие жаростойкие стали. А обеспечить долговечность реактора дожигателя при максимальных пробегах машины или наработке двигателя трактора могут только нержавеющие стали с содержанием 12...18 % хрома и 3...6 % алюминия.

Установка дожигателя в системе выпуска двигателя приводит к увеличению противодавления в 2...2,5 раза, что вызывает до 3...5 % потерь выходной мощности двигателя. Температура ОГ, выходящих из термических дожигателей, несколько выше, чем ОГ, выходящих из обычного выпускного трубопровода.

Термические дожигатели при примерно одинаковой эффективности очистки ОГ от продуктов неполного сгорания по сравнению с каталитическими нейтрализаторами обладают явными эксплуатационными преимуществами: большая долговечность, они не требуют замены и досыпки катализатора через каждые 20 000...40 000 км пробега машин, их эффективность с наработкой не ухудшается.

Однако термические дожигатели характеризуются и рядом недостатков, которые необходимо устранить. Основные из них: термические дожигатели велики и у целого ряда типов тракторов и автомобилей не могут быть размещены около двигателя; более того, конфигурация некоторых современных двигателей не допускает установки до-

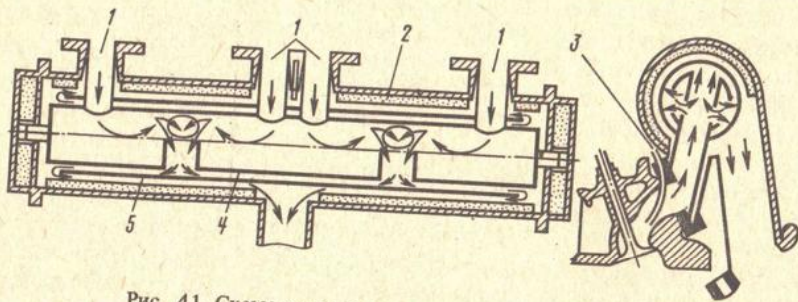


Рис. 41. Схема конструкции термического реактора:

1 — выпускные клапаны; 2 — асбестовая тепловая изоляция; 3 — трубопровод подачи воздуха под выпускные клапаны; 4 — внутренняя камера; 5 — экран из жаростойкой стали

жигателя; существующая технология изготовления термических дожигателей и применяемые материалы дороги.

Пример конструкции термического дожигателя показан на рисунке 41. В этой конструкции смесь ОГ с воздухом подается во внутреннюю цилиндрическую камеру реактора. Изменение скорости и направления ОГ обеспечивает перемешивание этой смеси. Асбестовая изоляция и экран выполнены из жаростойкого металла.

**Каталитические нейтрализаторы.** Один из наиболее распространенных методов снижения токсичности дизеля — очистка ОГ с помощью каталитических нейтрализаторов (КН). Дизели работают с коэффициентом избытка воздуха, большим единицы, в их ОГ всегда содержится избыток кислорода. Поэтому независимо от типа дизеля и режима его работы в КН при температуре ОГ более 300 °С всегда имеются условия для эффективной очистки ОГ от CO и CH<sub>x</sub>. Для снижения выброса NO<sub>x</sub> с помощью КН в дизелях необходимо создавать восстановительную среду за счет устранения из ОГ свободного кислорода, что весьма затруднительно и на практике не используется. Поэтому КН для дизелей применяются только для очистки ОГ от CO, CH<sub>x</sub> и RCHO.

Независимо от конструкции КН отработавшие газы дизелей проходят через слой катализатора (на шариковых, насыпных, стержневых или сотовых носителях), на поверхности которого при температуре ОГ более 250...300 °С происходит беспламенное каталитическое окисление CO, CH<sub>x</sub>, RCHO. Эффективность очистки ОГ от этих компонентов колеблется, как правило, от 70 до 100 %. В СССР для дизелей широкое применение нашли катализаторы ШПК-2 и ШПК-1 на основе платины.

Созданные лучшие опытные образцы нейтрализаторов (НКД-240) заполнялись платиновым катализатором ШПК-2 (разработка НИФХИ им. Карпова). Нейтрализатор (НКД-240) разрабатывался и испытывался применительно к карьерным автосамосвалам БелАЗ-540А.

Испытаниями нейтрализаторов НКД-240 было установлено, что они, обладая достаточно высокой эффективностью очистки ОГ дизелей от CO и CH<sub>x</sub>, имели недостаточный ресурс.

Для повышения ресурса нейтрализатора НКД-241 в отличие от модели НКД-240 была установлена плавающая решетка реактора, что позволило ей свободно перемещаться в осевом направлении при любых температурных деформациях.

Совершенствование реактора нейтрализатора, и прежде всего разделением его на секции, можно существенно уменьшить коробление корпуса реактора и снизить покол гранул катализатора в процессе эксплуатации. Наиболее распространенными в этом смысле являются конструкции с секционными, желательнее плоскими реакторами.

Для плоских реакторов разрушение гранул катализатора в 3...6 раз меньше по сравнению с цилиндрическими реакторами. Секционирование также позволяет в 3...5 раз снизить разрушение катализатора.

Преимущественный характер разрушения в плоском секционном реакторе — сколы и отпечатки небольшой площади, тогда как в цилиндрических реакторах (даже секционных) значительное количество гранул разрушается полностью.

Дробление, истирание и покол катализатора происходят также при различных относительных удлинениях внешней и внутренней решеток реактора при резких сменах температур ОГ, а также при "закисывании" катализатора стенками реактора.

С учетом принципа секционирования разработана более совершенная конструкция нейтрализатора — Н-46А2. Этот нейтрализатор предназначен для дожигания (беспламенного окисления) в присутствии катализатора СО и  $\text{CH}_x$ , содержащихся в ОГ дизеля Д-160, установленного на тракторе Т-130М.

Нейтрализатор Н-46А2 (рис. 42) конструктивно состоит из двух основных частей: корпуса 1 и реактора 2. Корпус представляет собой цилиндр 3, к которому со стороны торцов приварены фланец 4 и дно 5, а к боковой поверхности — фланец 6 с отверстием для выхода ОГ. Фланец 4 имеет отверстие, расположенное эксцентрично оси цилиндра. Соосно с этим отверстием к фланцу 4 приварен реактор, объем которого продольными перегородками 7 разделен на три полости, заполненные катализатором 8. Для засыпки полостей катализатором во фланце 4 имеются три отверстия. Крышка 9 является заглушкой засыпных отверстий реактора, впускным патрубком и соединительным элементом нейтрализатора с корпусом турбокомпрессора двигателя Д-160.

Реактор состоит из двух concentрических цилиндрических решеток 10 и 11, перфорированных продольными отверстиями. Со стороны торца, противоположного фланцу 4, к наружной решетке приварено глухое днище 12 с отверстием для посадки на штырь 13 дна. Внутренняя решетка реактора свободно расположена в цилиндрических гнездах

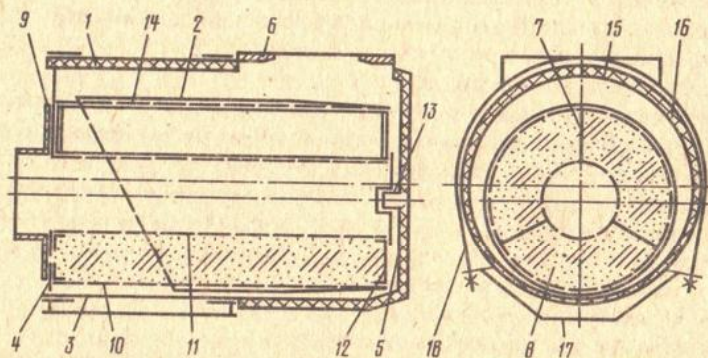


Рис. 42. Каталитический нейтрализатор Н-46А2

фланца 4 и днища 12. Такая конструкция обеспечивает свободное, независимое одно от другого продольное тепловое перемещение решеток и самого реактора относительно корпуса. Для обеспечения равномерной теплонапряженности реактора на нем установлен кожух 14. Корпус нейтрализатора снабжен защитным экраном 15 и теплоизоляцией 16. Для установки нейтрализатора на трактор служит подставка 17, к которой его крепят хомутами 18. Отработавшие газы двигателя поступают в нейтрализатор через впускные отверстия в крышке 9 и проходят через слой катализатора 8, где происходит химический процесс дожигания продуктов неполного сгорания топлива, далее ОГ выходят в атмосферу через выпускной патрубок.

Для замены и перезасыпки катализатора нейтрализатор должен быть снят с трактора.

В ЦНИИМе разработаны КН для ДВС мощностью от 20 до 500 кВт (рис. 43), серийное производство которых освоено промышленностью [29].

Выпускаемые алюмоплатиновые катализаторы обеспечивают эффективную очистку ОГ двигателей в течение 250...500 моточасов, затем активность катализатора снижается и требуется замена катализатора или его регенерация. Учитывая высокую стоимость алюмоплатиновых катализаторов (до 15...20 руб. за 1 кг), дефицит металлов платиновой группы и постоянно возрастающий спрос на каталитические нейтрализаторы, целесообразно регенерировать катализаторы, а не менять. Также в ЦНИИМе разработан простой и эффективный способ регенерации катализатора методом водной промывки.

Сущность жидкостной регенерации катализатора заключается в обработке его водными растворами, которые способствуют удалению частиц сажи и несгоревших углеводородов с поверхности катализатора, а также вымыванию сульфата алюминия. Для интенсификации процесса регенерации катализатора можно использовать сжатый воздух, подаваемый вместе с загруженным катализатором через реактор, а также промывать катализатор горячей водой (температура 50...100 °С). Регенерация жидкостным методом обеспечивает 70...90%-ное восстановление активности катализатора.

Наиболее совершенными аппаратами для очистки ОГ принято считать нейтрализаторы с блочным катализатором. Использование блочных катализаторов — более прогрессивное решение и позволяет достигать в КН по сравнению с гранулированным катализатором меньших объемов и площадей поперечного сечения. Необходимо указать также и то, что уменьшенная масса монолитного катализатора и его высокоэффективная геометрическая поверхность существенно уменьшают время разогрева нейтрализатора при холодных пусках, что является само по себе важным положительным качеством.

Геометрическая форма и структура каталитического носителя также играют важную роль в выборе конструкции нейтрализатора.

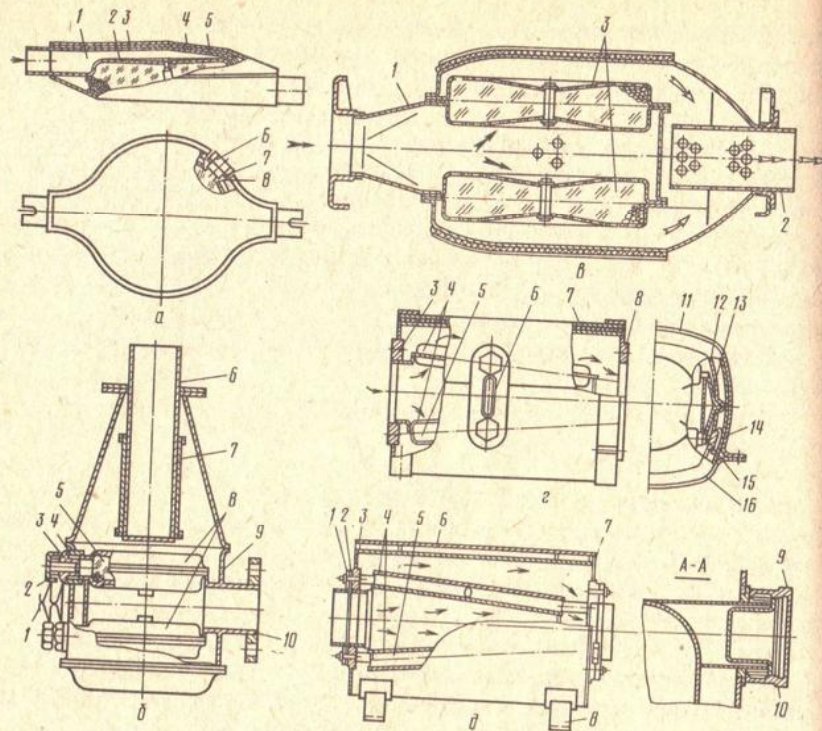


Рис. 43. Каталитические нейтрализаторы:

*a* – типа Н-13: 1 – корпус; 2 – реактор; 3 – теплоизоляция; 4 – экран; 5 – катализатор; 6 – пробка; 7 – шайба; 8 – втулка; *б* – типа Н-42: 1 – проволока; 2 – заглушка; 3 – штуцер; 4 – втулка; 5 – катализатор; 6 – выходной патрубок; 7 – искрогаситель; 8 – реактор; 9 – корпус; 10 – входной патрубок; *в* – типа Н-32: 1 – впускной патрубок; 2 – выпускной патрубок; 3 – реакторы; *г* – типа 31Б: 1 – заглушка; 2 – прокладка; 3 – фланец; 4 – реакторы; 5 – катализатор; 6 – проволока; 7 – теплоизоляция; 8 – фланец; 9 – прокладка; 10 – заглушка; 11 – полухомуты; 12 – корпус; 13 – опоры; 14 – заглушка; 15 – пробка; 16 – полухомут; *д* – типа НД-38А: 1 – фланец; 2 – прокладка; 3 – фланец; 4 – реакторы; 5 – катализатор; 6 – корпус; 7 – фланец; 8 – патрубок; 9 – заглушка; 10 – пробка

Существуют два вида катализаторов, полученных нанесением активного компонента на гранулированный (чаще всего сферический) носитель блочной или монолитной структуры. Соответственно различают и две конструкции нейтрализаторов. Основным достоинством нейтрализаторов с гранулированным катализатором является возможность замены вышедшего из строя катализатора. К числу недостатков нейтрализаторов подобного типа относятся высокое аэродинамическое сопротивление каталитического слоя, а также недостаточно полное ис-

пользование каталитической поверхности за счет наличия застойных зон.

**Жидкостные нейтрализаторы.** Заполненный водой ЖН интенсивно поглощает (на 50...100%), но не улавливает  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ . Такие нейтрализаторы эффективно поглощают сажу и бенз(а)пирен.

Включаемый в систему очистки ОГ дизелей, работающих в местах с ограниченным воздухообменом, каталитический окислительный нейтрализатор стоит по ходу газового потока до ЖН и существенно снижает запах ОГ и содержание в них  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  и альдегидов, но значительно увеличивает выбросы  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Поэтому при использовании такой комбинированной системы очистки возрастает необходимость поглощения тумана  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с помощью ЖН. Можно ожидать эффективного поглощения ЖН низших спиртов, фенолов, альдегидов, кетонов и кислот за счет их высокой растворимости в воде, превышающей растворимость  $\text{SO}_2$ .

В отличие от газов растворимость многих жидких и твердых веществ увеличивается с повышением температуры. Например, растворимость фенола возрастает от 8,3 мас. % при температуре  $20^\circ\text{C}$  до полной взаимной смешиваемости при  $66^\circ\text{C}$ .

Температура воды в ЖН порядка  $40^\circ\text{C}$  благоприятна для поглощения газов ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , формальдегид); при повышении температуры до  $90^\circ\text{C}$  ухудшение поглощения газов в какой-то степени компенсируется увеличением поглощения паров жидких и твердых веществ за счет их растворения; приближение температуры воды к  $100^\circ\text{C}$  приведет к усилению процессов перегонки с паром и азеотропной перегонке, мешающих удерживанию растворенных и осажденных веществ.

Конденсация жидких компонентов ОГ дизелей в интервале температур работы ЖН маловероятна из-за малых парциальных давлений, которые при охлаждении не могут превысить давления насыщенного пара.

При испытаниях ЖН исследовались растворы различной концентрации сернистого натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) с добавкой гидрохинона, соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), двууглекислой соды ( $\text{NaHCO}_3$ ), едкого калия (KOH), едкого натрия (NaOH) и их смесей. Анализ химических реакций, наблюдающихся при жидкостной нейтрализации ОГ, позволяет сделать вывод, что при наибольшей поглотительной способности по всем участвующим в процессе жидкостной очистки компонентам наиболее практичны водные растворы щелочей KOH и NaOH (2...10%) либо солевые растворы. При менее жестких требованиях по токсичности ОГ в ЖН часто применяют чистую воду.

В выпускной системе дизеля имеются благоприятные условия для коагуляции частиц сажи, размер которых, начиная от долей микрона, увеличивается в выпускном тракте до 0,1...10 мкм. В ЖН при понижении температуры ОГ при смешивании их с нейтрализующим раствором насыщенные пары воды, а также углеводороды переходят в пересыщенное состояние, благодаря чему начинается образование зароды-

шей, приводящих в образованию капель. Несмотря на несмачиваемость сажи в нормальных условиях, зародышеобразование в первую очередь начинается на поверхности сажевых частиц. Под воздействием теплоты ОГ в нейтрализующем растворе происходит интенсивное испарение воды. В результате даже снижение температуры ОГ после слоя нейтрализующего раствора на 5...10 °С приводит к интенсивному образованию капель, которые поглощают сажевые частицы. При выходе из нейтрализатора капли с сажевыми частицами достаточно легко улавливаются фильтрами.

Во всех конструкциях ЖН происходит в той или иной степени брызгоунос. В связи с растворением и химическим связыванием токсичных компонентов унос части нейтрализующей жидкости снижает эффективность работы аппарата. На каплю действуют те же силы, которые воздействуют на взвешенные частицы в потоке ОГ. Преимущество отделения капель перед отделением твердых частиц состоит в том, что агломерация жидких капель происходит непосредственно после сепарации и уловленные капли могут быть отведены из устройства в виде потока жидкости, т. е. отпадает необходимость в разгрузке и очистке, а также не изменяется сопротивление устройства.

Простейшее устройство для сепарации и конденсации капель с использованием силы тяжести представляет собой камеру, в которой снижается скорость ОГ. В результате все капли, скорость осаждения которых больше вертикальной скорости потока, будут отделяться. Однако для капель диаметром 100 мкм скорость осаждения составляет 0,24 м/с, что требует значительных габаритов сепараторов и фильтров.

В большинстве случаев для сепарации капель из ОГ применяют различные виды насадок, которые устанавливают на выходе ОГ из ЖН в виде слоя толщиной 80...200 мм и более.

В качестве насадок в ЖН используют жалюзи волнообразного и зигзагообразного профилей, различные насадки, проволочную набивку (диаметр проволоки от 0,07 до 0,4 мм), стружку, шлак, кусковой известняк, активированный уголь, силикагель, керамические кольца, металлическую шерсть и т. д. Известняк и активированный уголь наиболее желательны, так как наряду с сепарацией капель они способствуют дополнительной химической очистке и фильтрации ОГ.

Оптимальная скорость ОГ, как правило, составляет 2...3 м/с. При скорости ОГ выше расчетной наступает вторичный унос ранее осевших капель.

На рисунке 44 показаны типичные кривые для четырех классов ЖН применительно к очистным промышленным мокрым установкам. Эффективность очистки ОГ от сажи сильно изменяется в пределах заданного размера частиц [29]. Представленные данные дают качественную оценку мокрых пыле- и золоулавливателей.

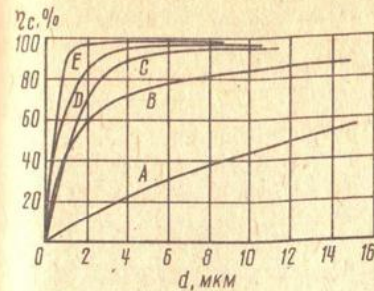


Рис. 44. Кривые эффективности улавливания для различных типов пылеулавливателей:

A — высокопроизводительный циклон; B — высокоэффективный циклон; C — электрофильтр сухого типа; D — брызгопромывная колонна; E — скруббер Вентури

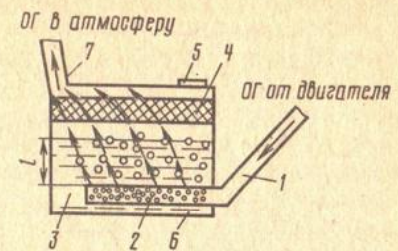


Рис. 45. Принципиальная схема жидкостного нейтрализатора:

1 — выпускной трубопровод дизеля; 2 — перфорированная труба; 3 — емкость с нейтрализующим раствором; 4 — фильтр; 5 — заливная горловина; 6 — корпус нейтрализатора; 7 — трубопровод; 1 — уровень заливки нейтрализующего раствора

Поскольку в процессе работы применяемые в ЖН растворы насыщаются токсичными компонентами, эффективность их очистки в течение рабочей смены снижается.

Рассмотрим некоторые особенности работы различных типов ЖН. Жидкостные нейтрализаторы барботажного типа. Подавляющее количество разработанных и эксплуатируемых ЖН относится к типу барботажных с объемными скоростями 500...3700 ч<sup>-1</sup>. В частности, их применяют на подземном автосамосвале МоАЗ-6401-9598, подземных бульдозерах Д-108 и бульдозерах Д-535, на самосвалах "Кируна-трак" (Швеция), погрузочно-доставочных машинах фирмы "Зальциттер", подземном дизельном оборудовании США, Франции, Японии, Канады и других стран.

Принцип их действия основан на пропускании ОГ дизеля через слой нейтрализующего раствора (рис. 45). Сопротивление перечисленных серийно выпускаемых ЖН составляет от 8 до 10 кН/м<sup>2</sup>. Эффективность очистки ОГ с помощью ЖН барботажного типа составляет по альдегидам до 50...100 %, по NO<sub>x</sub> — до 10...20, сажи — до 10...30 %.

В барботажных ЖН отработавшие газы продувают через слой нейтрализующего раствора. Если слой жидкости достаточно велик (как правило, он составляет 30...60 см), то ОГ движутся через него в виде отдельных пузырьков. В результате трения о поверхность жидкости, ограничивающей каждый пузырек, заключенные в нем ОГ приобретают циркуляцию, скорость которой пропорциональна скорости подъема пузырька. Токсичные компоненты газовой фазы при этом диффундируют к поверхности жидкости либо в ней растворяются, либо химиче-



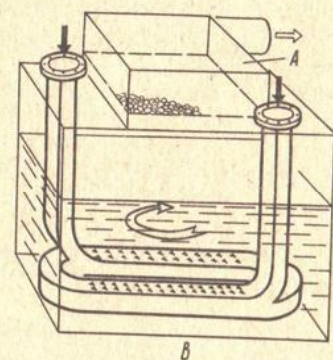
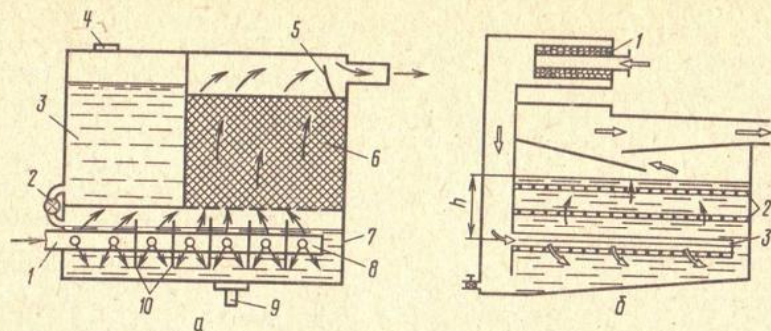


Рис. 46. Модификация барботажных жидкостных нейтрализаторов:

*а* — нейтрализатор НТЖ-2: 1 — выпускная труба; 2 — перепускной кран; 3 — дополнительный бак; 4 — заливная горловина; 5 — сепаратор; 6 — металлическая стружка; 7 — рабочий бак; 8 — коллектор; 9 — пробка сливного отверстия; 10 — перегородки;

*б* — система снижения токсичности ОГ подземного автосамосвала МоАЗ-6401: 1 — каталитический реактор; 2 — успокоительные решетки; 3 — газораспределитель; *в* — жидкостный катализатор с кольцевым вводом ОГ: А — влагоотделительная насадка

ски связываются. Компоненты жидкой и твердой фаз ОГ, находящиеся внутри пузырьков, сепарируются к поверхности жидкости под действием инерционных сил, обусловленных циркуляцией ОГ внутри пузырька, а также под влиянием диффузии и седиментации. Одновременно происходит охлаждение ОГ, что приводит к снижению гидродинамического сопротивления ЖН. Несмотря на невысокие показатели эффективности по очистке ОГ, они (ввиду относительной простоты при умеренных габаритных данных) нашли наибольшее применение для дизелей.

Некоторые модификации ЖН даны на рисунке 46. Из них наибольший интерес представляет модель с кольцевым вводом ОГ, в которой в "улитке" достигается увеличение площади и времени контакта ОГ с нейтрализующим раствором, что приводит и к повышению эффективности очистки ОГ.

Поверхностные и пленочные ЖН. В них контакт ОГ с нейтрализующим раствором происходит на его поверхности, ве-

личина которой определяется конструкцией жидкостного аппарата. В целом можно отметить недостаточную эффективность такого рода нейтрализаторов и их большие габариты. По этой причине их применяют редко.

Ранее при проектировании машин не учитывался вопрос снижения токсичности, установка ЖН на них очень затруднена, а в ряде случаев и вообще невозможна. Для таких машин перспективной является принципиально новая конструкция ЖН, у которого реализована идея использования кузова (платформы) машины для размещения в его двойных стенках днища, боковых и переднем бортах ЖН. Такое исполнение позволяет оставить практически без изменения общую компоновку машины и ее габариты.

На рисунке 47, *а* приведена общая схема такого ЖН на примере автосамосвалов БелАЗ-540А. В полостях по всей площади днища, частично в боковых и переднем бортах платформы машины расположена основная емкость ЖН, имеющая заливное отверстие с герметичным уплотнением, кран для контроля уровня нейтрализующего раствора и сливной кран. В боковых бортах и днище располагается также дополнительная емкость со сливным краном. В передней и частично в передней части боковых бортов платформы расположен доливочный бак, имеющий заливное отверстие с герметичным уплотнением и сливной кран. В контрфорсах при выходе ОГ из ЖН установлены фильтры, расположенные на специальных опорных плитах, сепараторы и щелевидные выпускные окна.

Данные испытаний нейтрализатора для трех режимов работы двигателя представлены в таблице 22. На рисунках 47, *б* и *в* представлены конструкции ЖН для автосамосвалов МАЗ-503А, КрАЗ-256Б.

22. Эффективность очистки ОГ дизеля с помощью ЖН

| Нагрузка, %<br>номинальной | Очистка по компонентам, % |                 |           |                 |                              |
|----------------------------|---------------------------|-----------------|-----------|-----------------|------------------------------|
|                            | сажа                      | СН <sub>х</sub> | альдегиды | NO <sub>х</sub> | запах, слезоточивое действие |
| Холостой ход               | 90                        | 80...90         | 80...90   | До 10...15      | Значительное снижение        |
| 50                         | 40...50                   | 70...80         | 80...90   | До 10           | То же                        |
| 100                        | 20                        | 65...80         | 70...80   | До 10           | "                            |

Жидкостные нейтрализаторы ударно-инерционного действия. В них контакт ОГ с нейтрализующим раствором осуществляется за счет направления потока ОГ сверху на поверхность раствора. При этом очистка газовой фазы ОГ идет по образуемой поверхности контакта двух фаз, а твердые частицы попадают и задерживаются в растворе благодаря силам гравитации и инерции.

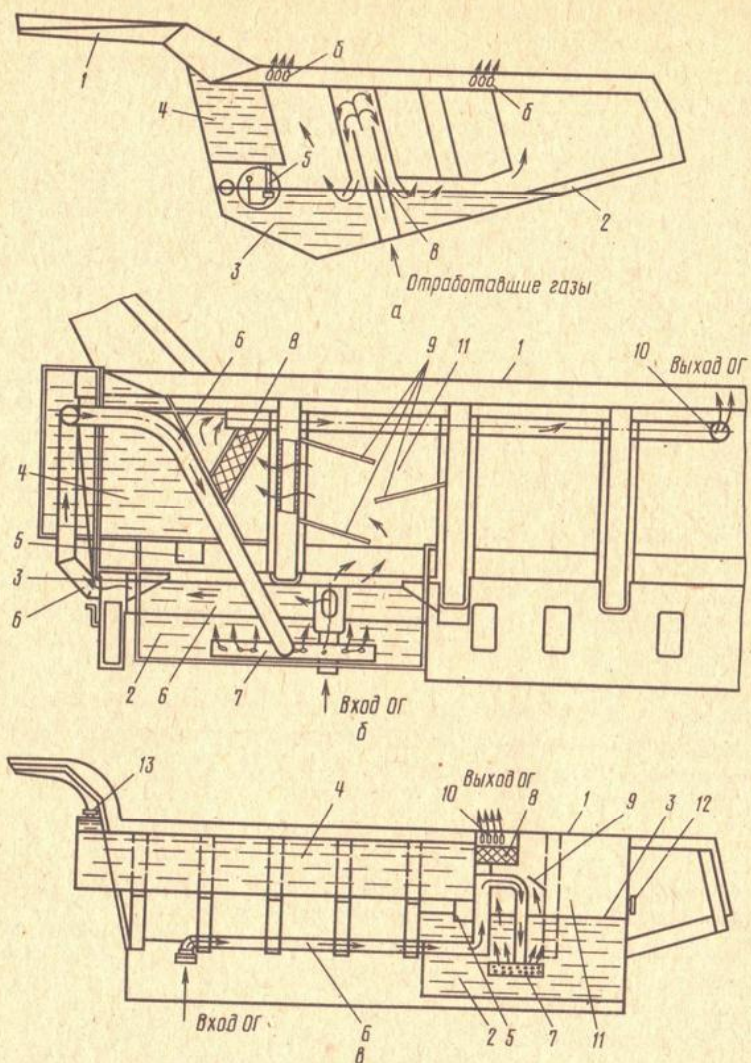


Рис. 47. Модификация кузовных жидкостных нейтрализаторов:

*а* — для автосамосвала БелАЗ-540А: 1 — кузов; 2 — емкость; 3 — ресивер; 4 — бак; 5 — трубка; 6 — для автосамосвала МАЗ-503А: 1 — кузов; 2 — рабочая емкость; 3 — крышка емкости 2; 4 — запасная емкость; 5 — переливной механизм; 6 — труба; 7 — барботажный участок; 8 — фильтр; 9 — отбойные пластины; 10 — выпускной трубопровод; 11 — запасная емкость; *б* — для автосамосвала КраЗ-256Б: 1 — кузов; 2 — рабочая емкость; 3 — крышка емкости; 4 — запасная емкость; 5 — переливной механизм; 6 — труба; 7 — барботажный участок; 8 — фильтр; 9 — отбойные пластины; 10 — щелевые окна; 11 — запасная емкость; 12 и 13 — заливные горловины

В целом эффективность этих очистителей ниже барботажных, они удовлетворительно улавливают лишь частицы размером более 20 мкм и для дизелей неперспективны.

**Жидкостные нейтрализаторы центробежного действия.** В них осуществляется орошение ОГ в объемах, где газовый поток вращается с помощью специальных направляющих лопаток либо за счет тангенциального подвода ОГ. Применение их целесообразно при улавливании сажевых частиц размером более 10...15 мкм и для дизелей они малоэффективны.

**Динамические ЖН.** Отработавшие газы в них контактируют с раствором в виде малых капель, интенсивное дробление которого осуществляется с помощью лопаток ротора, имеющего привод от электродвигателя. Широкого распространения они не нашли главным образом из-за очень больших габаритов и сложности конструкции.

Наиболее эффективными следует считать комбинированные схемы ЖН, в которых используются различные комбинации перечисленных выше типов ЖН, в первую очередь распыливающего и насадочного типов.

**Насадочные ЖН.** Они представляют собой аппараты, в которых ОГ пропускают через слой насадки, орошаемый нейтрализующим раствором. Эти нейтрализаторы, как правило, более эффективны, чем поверхностно-пленочные и барботажные. Они обладают одновременно относительно небольшими габаритами и гидродинамическим сопротивлением. Насадка предназначена для увеличения поверхности контакта между нейтрализующим раствором и ОГ. Обычно в этом смысле более предпочтительна насадка седловидной формы или кольца Рашига, которые могут быть изготовлены из высокотемпературных керамических материалов. Хорошей насадкой является также проволочная шерсть.

Принцип действия распыливающих ЖН основан на интенсивном дроблении газовым потоком, движущимся с относительно большой скоростью орошающего его нейтрализующего раствора. Осаждению частиц на каплях и растворению в них газовой фазы способствуют высокие относительные скорости между ними. Наиболее эффективными ЖН являются скрубберы Вентури, представляющие собой трубу Вентури, в которую подводится нейтрализующий раствор, а перед выбросом ОГ в атмосферу устанавливается каплеуловитель. В целом распыливающая конструкция ЖН характеризуется очень малыми габаритами, простотой конструкции и эксплуатации и очень высокой эффективностью действия при умеренных сопротивлениях.

Эффективность работы ЖН значительно зависит от режимов работы двигателя. При длительной работе дизеля на режимах, близких к номинальным, происходит значительный нагрев нейтрализующего раствора, в результате чего снижаются его поглотительная способность и эффективность очистки ОГ. Одновременно при таких условиях увеличивается расход нейтрализующего раствора. Поэтому наибольшей эф-

фективностью отличаются ЖН, перед входом в которые ОГ предварительно охлаждаются. Использование для этого теплообменников нецелесообразно ввиду их больших габаритов, сложности конструкции и большой массы.

Наиболее простым и эффективным решением следует считать предварительную подачу воды в выпускной трубопровод сразу после двигателя до поступления ОГ непосредственно в ЖН. При этом резко увеличивается время и поверхность контакта ОГ и раствора, снижается температура ОГ, что увеличивает поглотительную способность раствора в самом нейтрализаторе.

С учетом изложенного при проектировании ЖН для трактора Т-130 был разработан действующий макет.

В качестве генератора 1 (рис. 48) отработавших газов был использован дизель ЯМЗ-236, расходные характеристики которого по ОГ соответствовали характеристикам двигателя Д-160. В выпускной системе двигателя были последовательно установлены каталитический нейтрализатор 2, сопло Вентури 3 и насадочный нейтрализатор 4, в котором очистка осуществлялась на смоченной насыпке гравия за счет подачи воды в сопло Вентури. На схеме цифрой 5 обозначена входная камера с насадкой (насыпкой), 6 — выходная камера с насадкой, разделенные поперечной перегородкой 7, 8 — выпускной коллектор, 9 — штуцер для слива конденсата воды из корпуса, 10 — ротаметр для замера расхода воды, подаваемой через распылитель в сопло Вентури из системы водоснабжения стенда. Стрелками указано направление потока ОГ и воды.

Наибольшей эффективностью очистки обладают ЖН, включающие в себя сопло Вентури с подачей воды в него из водяного бака в количестве, соответствующем условиям полного испарения воды, и емкость с насыпкой.

**Рециркуляция отработавших газов.** Под рециркуляцией ОГ понимается такой способ работы ДВС, при котором искусственно увеличивается доля остаточных газов. Это достигается либо регулированием

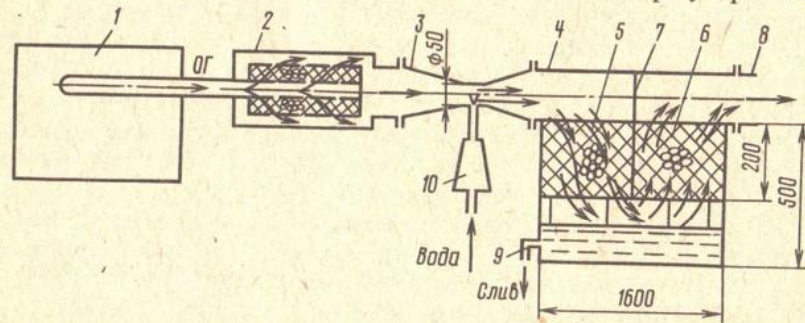


Рис. 48. Схема установки макетного образца жидкостного нейтрализатора

фаз газораспределения, либо за счет соединения впускного и выпускного трубопроводов рециркуляционным.

В рециркуляционном трубопроводе устанавливается орган регулирования — заслонка 4 (рис. 49). На выпуск могут возвращаться как неохлаждаемые ОГ, так и охлаждаемые — так называемые "горячая" и "холодная" рециркуляции.

Рециркуляция влияет на состав ОГ как вследствие воздействия на рабочий процесс, так и за счет снижения выброса общей массы ОГ из двигателя в атмосферу, поскольку часть газов возвращается на впуск дизеля.

Наибольшее снижение выброса  $\text{NO}_x$  на единицу степени рециркуляции наблюдается при повышенных нагрузках. Применение рециркуляции ОГ приводит к запаздыванию начала сгорания и замедлению его развития, что влечет за собой снижение температуры рабочей смеси и сокращение периода поддержания максимальных температур. Основная масса  $\text{NO}_x$  образуется в первой половине процесса сгорания. Полученное запаздывание процесса тепловыделения является, по-видимому, основным фактором, вносящим вклад в образование  $\text{NO}_x$ . Значительное влияние при этом должно оказывать снижение концентрации кислорода и увеличение теплоемкости впускного заряда (за счет увеличения содержания в нем  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ ).

Все перечисленные факторы определяют снижение уровня максимальных температур в диффузионном пламени дизельного процесса.

Применение неохлажденных ОГ не только эффективно уменьшает выброс  $\text{NO}_x$  (особенно для дизелей с непосредственным впрыскиванием), но и приводит к заметному росту выброса сажи. Анализ имеющихся данных показывает, что применение "холодной" рециркуляции

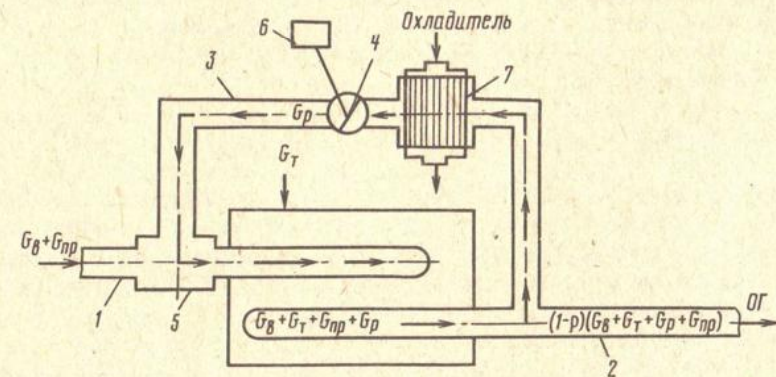


Рис. 49. Принципиальная схема системы рециркуляции ОГ:

1 — впускной трубопровод; 2 — выпускной трубопровод; 3 — рециркуляционный трубопровод; 4 — заслонка; 5 — ресивер; 6 — привод; 7 — охладитель

ОГ с точки зрения снижения  $\text{NO}_x$  и токсичности ОГ дизеля в целом более эффективно. Однако с практической точки зрения конструкция такой системы рециркуляции значительно сложнее и дороже.

Под степенью рециркуляции  $\rho$  понимают отношение массовой части ОГ, циркулирующих в цикле, ко всему массовому заряду рабочего тела, поступающего в цилиндры дизеля. Согласно данному определению, можно записать:

$$\rho = \frac{G_p}{G_\Sigma}, \quad (38)$$

где  $G_p$  — массовый расход рециркулируемых ОГ;  $G_\Sigma$  — массовый расход всего впускного заряда, поступающего в цилиндры.

При этом

$$G_\Sigma = G_B + G_{пр} + G_T + G_p, \quad (39)$$

где  $G_B$  — массовый расход воздуха, поступающего в цилиндры из атмосферы;  $G_{пр}$  — массовый расход присадок (например, воды) к рабочему телу;  $G_T$  — массовый расход топлива.

Пренебрегая из-за малости членами  $G_T$ ,  $G_{пр}$  получим приближенное соотношение:

$$G_\Sigma \approx G_B + G_p, \quad (40)$$

откуда

$$\rho = \frac{G_p}{G_p + G_B}. \quad (41)$$

Применительно к дизелю использование широко распространенного такого понятия, как коэффициент избытка воздуха, подсчитываемого по формуле:

$$\alpha = \frac{G_B}{L_B G_T} \quad (42)$$

(здесь  $L_B$  — обозначено теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг топлива), нельзя рассматривать как правомерное, поскольку в горении топлива, впрыскиваемого в цилиндр, участвует кроме кислорода воздуха также и кислород, содержащийся в циркулирующей части ОГ.

Введем термин "коэффициент избытка кислорода", который обозначим буквой  $\lambda$  (для отличия от  $\alpha$ ). Определим  $\lambda$  как отношение количества кислорода, поступающего в цилиндр ( $G_{O_2}$ ), к количеству кислорода, теоретически необходимому для горения топлива и равному  $L_{O_2} G_T$  (через  $L_{O_2}$  здесь обозначено теоретическое количество кислорода, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива).

Согласно определению

$$\lambda = \frac{G_{O_2}}{L_{O_2} G_T} = \frac{G_{O_2}}{3,35 G_T}. \quad (43)$$

Пренебрегая неполнотой сгорания топлива, с достаточной для практических расчетов точностью можно записать:

$$\lambda = \frac{G_B \cdot 0,23 - \rho G_T L_{O_2}}{(1 - \rho) G_T L_{O_2}}; \quad (44)$$

$$\lambda = \frac{\alpha - \rho}{1 - \rho}. \quad (45)$$

При практическом использовании для подсчета избытка кислорода необходимо знать расходы воздуха и топлива, а также степень рециркуляции ОГ. При измерении расхода рециркулирующей части ОГ прямым методом могут применяться расходомерные устройства, например ротационные счетчики, сопла или диафрагма. В практике для определения степени рециркуляции применяется выражение

$$\rho \approx \frac{t_{см} - t_B}{t_p - t_{см}}, \quad (46)$$

где  $t_{см}$  — температура смеси газов на выходе из ресивера;  $t_p$  — температура рециркулируемых ОГ на входе в ресивер;  $t_B$  — температура воздуха на входе в ресивер.

В ресивере происходит смешение ОГ с впускным воздухом. Точность подсчета степени рециркуляции по формуле составляет 5%. Оптимальное регулирование перепуска ОГ должно осуществляться таким образом, чтобы коэффициент избытка кислорода в цилиндрах дизеля на любых режимах работы был достаточно велик (около 2...2,5) и постоянен для процесса нормального горения. Такому закону практически отвечает линейная зависимость степени рециркуляции от нагрузки.

Результаты испытаний по определению влияния рециркуляции неохлаждаемых ОГ на токсичность дизеля Д-240 представлены на рисунке 50.

Для всех частот вращения коленчатого вала двигателя увеличение степени рециркуляции  $\rho$  на различных нагрузочных режимах приводит к тем большему снижению концентрации  $\text{NO}_x$ , чем выше нагрузка дизеля. Концентрация  $\text{NO}_x$  на холостых оборотах практически не изменяется. Тем не менее выбросы как  $\text{NO}_x$ , так и всего количества ОГ в атмосферу уменьшаются пропорционально  $\rho$ . В целом полученные зависимости изменения концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ имеют вид парабол, максимум которых смещается в сторону снижения  $\rho$  при увеличении нагрузки дизеля.

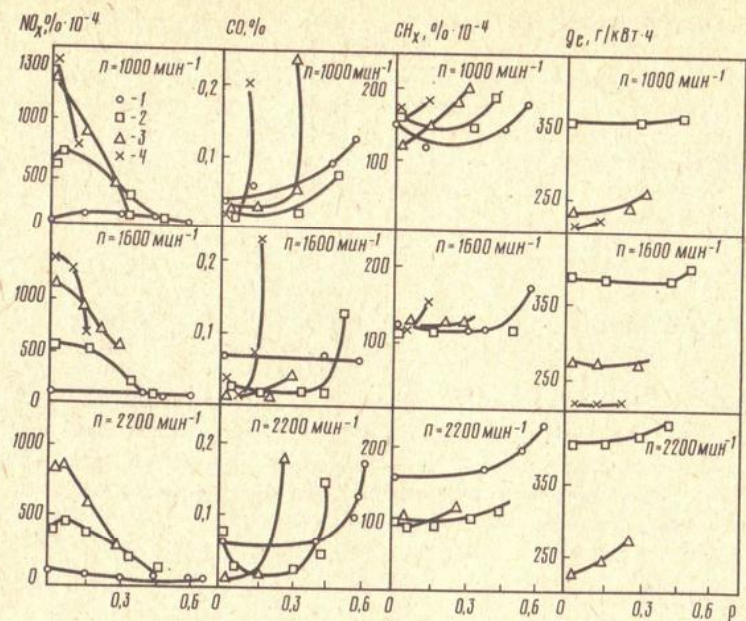


Рис. 50. Влияние рециркуляции отработавших газов на их токсичность и удельный расход топлива при различных нагрузках дизеля Д-240:  
1 – 0,03 МПа; 2 – 0,185 МПа; 3 – 0,370 МПа; 4 – 0,555 МПа

Концентрации  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$  по мере увеличения  $\rho$  сначала остаются постоянными, а затем, начиная с определенного значения  $\rho$ , зависящего от нагрузки дизеля, резко возрастают.

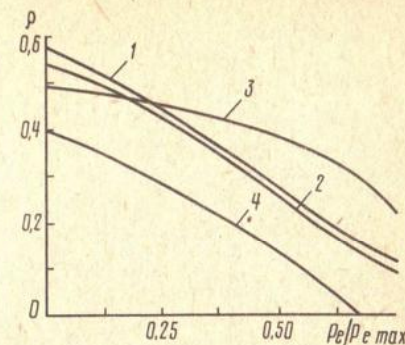
Если принять содержание  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$  в качестве критерия, характеризующего степень совершенства процесса сгорания, то закон управления количеством рециркулируемых ОГ в зависимости от режимных параметров может быть найден по степеням рециркуляции, характеризующимся резким изменением концентраций указанных компонентов. Такая искомая для испытанного дизеля зависимость изменения  $\rho$  от относительного изменения нагрузки дизеля ( $p_e/p_{e \max}$ ), которая практически не зависит от скоростного режима работы двигателя, представлена на рисунке 51. Там же приведены аналогичные зависимости для вихрекамерного дизеля Д-50.

Как видно, полученные зависимости изменения  $\rho$  от относительной нагрузки трех дизелей качественно подобны.

При разработке практических рекомендаций по управлению системой рециркуляции ОГ необходимо кроме данных, приведенных на рисунках 50 и 51, учитывать влияние следующих факторов: атмосферные

Рис. 51. Зависимость изменения степени рециркуляции от нагрузки для различных дизелей:

1 – Д-240; 2 – Д-50; 3 – ЯМЗ-236;  
4 – закон, рекомендуемый для применения



условия, состав топлива, наработку двигателя, технологические допуски, быстродействие системы рециркуляции, тепловую инерционность элементов системы и двигателя и др. С учетом этого в качестве оптимального для исследованного дизеля и ряда других предлагается использовать закон управления рециркуляцией ОГ, представленный на рисунке 51 кривой 4.

Численная оценка найденного закона по методике 13-ступенчатого цикла США дана в таблице 23.

Из данных таблицы следует, что применение выбранного закона управления рециркуляцией ОГ двигателя Д-240 обеспечивает снижение суммарного выброса  $\text{NO}_x$  на 30,4 %,  $\text{CH}_x$  – примерно на 20 %;  $\text{CO}$  – на 6,3 %. При этом экономические показатели ухудшаются не более чем на 2...3 %.

Таким образом, применение систем рециркуляции ОГ на дизелях позволяет эффективно уменьшать токсичность ОГ по оксидам азота.

23. Влияние закона управления рециркуляцией на токсичность ОГ дизеля Д-240

| Варианты выбросов                 | Оценочные удельные выбросы |                 |                   |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|
|                                   | $q_{\text{NO}_x}$          | $q_{\text{CO}}$ | $q_{\text{CH}_x}$ |
| Выбросы без рециркуляции, г/кВт·ч | 12,7                       | 12,4            | 2,08              |
| Выбросы с рециркуляцией, г/кВт·ч  | 8,85                       | 11,6            | 1,66              |

При менее жестких требованиях по токсичности может быть достигнуто снижение выброса в атмосферу всех токсичных компонентов, а при более жестких – резкое снижение выброса  $\text{NO}_x$  при сохранении или даже увеличении выброса в атмосферу  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$ , а также возможном увеличении дымности ОГ и ухудшении топливной экономичности.

Применение рециркуляции ОГ облегчает пуск двигателя в условиях низких температур, при пониженных степенях сжатия, связанных с фор-

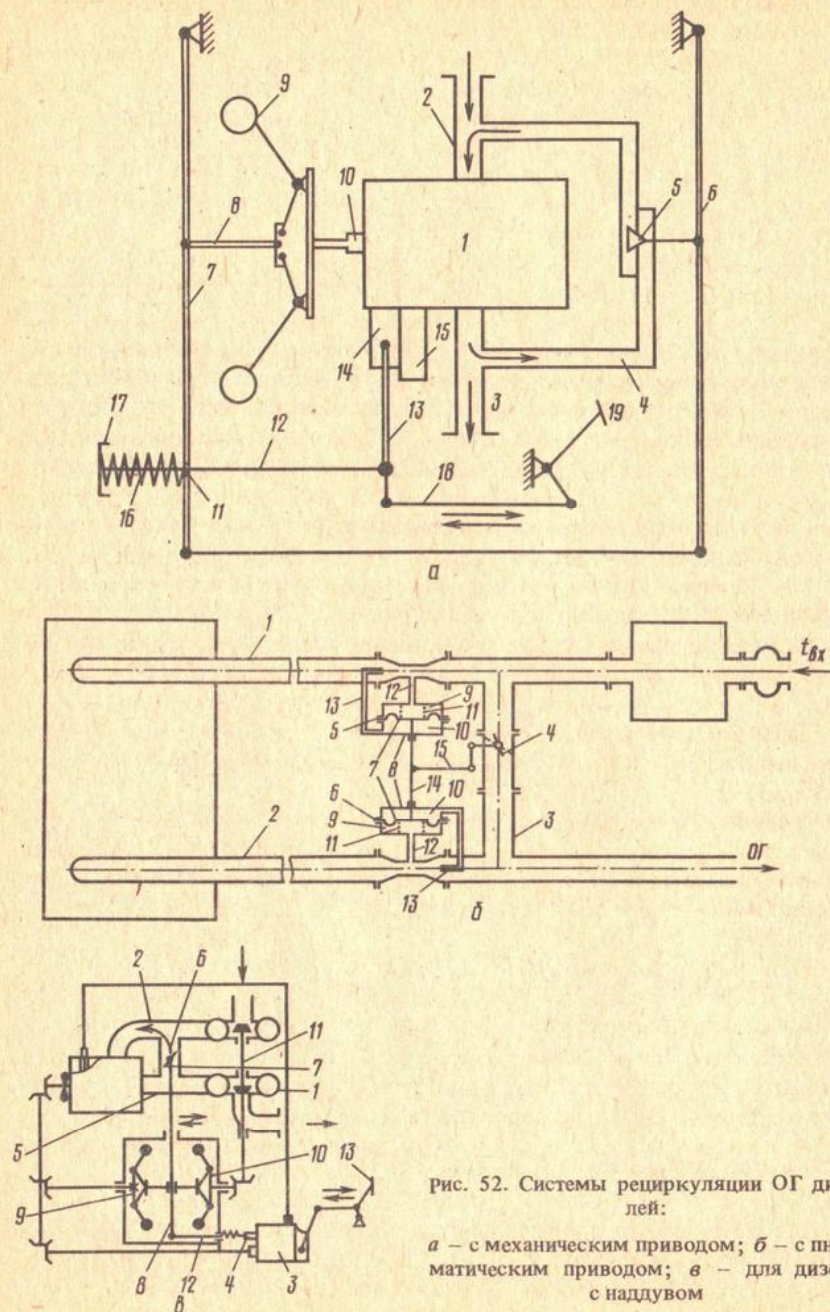


Рис. 52. Системы рециркуляции ОГ дизелей:

*а* — с механическим приводом; *б* — с пневматическим приводом; *в* — для дизеля с наддувом

сированием двигателя. После пуска дизеля система рециркуляции может быть отключена.

Основной вопрос, который необходимо решить при оборудовании дизеля системой рециркуляции ОГ, — разработка автоматически регулируемого привода, изменяющего закон управления перепуском ОГ в зависимости от режима работы дизеля. В качестве привода известны и могут быть применены различные системы: механические, гидравлические, пневматические, электронные системы регулирования, комбинированные и т. п. Рассмотрим некоторые из них.

Типичной системой рециркуляции отработавших газов (РОГ) с механическим приводом является система по а.с. 547538 СССР.

В этой системе дизель 1 (рис. 52, *а*) с впускным 2 и выпускным 3 трубопроводами содержит рециркуляционный трубопровод 4, в котором размещено управляемое запорное устройство 5, выполненное в виде клапана с рычажным приводом 6, подсоединенным через плечо 7 и шток 8 к датчику скорости 9, кинематически заблокированному с коленчатым валом 10 двигателя. В плече 7 системы рециркуляции выполнен паз 11, через который пропущена траверса 12, связанная одним концом с датчиком нагрузки 13, подсоединенным к рейке 14 топливного насоса 15, а другим концом через пружину 16 и установленную на траверсе плиту 17 — с плечом 7. Рейка топливного насоса через датчик нагрузки сообщена тягой 18 с педалью водителя 19.

На режимах частичных нагрузок педаль через тягу, траверсу, пружину 16, плечо 7 и рычажный привод приоткрывает клапан 5. В зависимости от частоты вращения вала 10 датчик 9 через шток 8, плечо 7 и механизм 6 корректирует положение клапана 5 таким образом, что при уменьшении нагрузки увеличивается количество перепускаемых ОГ по трубопроводу 4.

Системы рециркуляции ОГ с механическим приводом в целом характеризуются большим быстродействием, достаточно высокой надежностью в работе, но относительно сложны конструктивно и, как правило, заблокированы с рейкой топливного насоса, что снижает надежность работы дизеля в целом.

В системе рециркуляции ОГ с пневматическим приводом по а.с. 637543 СССР дизель с впускным 1 (рис. 52, *б*) и выпускным 2 трубопроводами снабжен связывающим их рециркуляционным трубопроводом 3. В последнем размещен запорный орган 4, заблокированный с первым 5 и вторым 6 датчиками расхода газа. Первый датчик подключен к впускному трубопроводу за трубопроводом 3 по ходу потока газа, а второй датчик подключен к выпускному трубопроводу перед рециркуляционным трубопроводом 3 по ходу потока ОГ.

Каждый из датчиков 5 и 6 может быть выполнен в виде мембраны 7, установленной в корпусе 8 и делящей его на две полости 9 и 10. Полость 9 снабжена пружиной 11 и соединена с трубопроводами 1 и 2 через трубку 12, а полость 10 — с теми же трубопроводами через трубку

Пито 13. Мембраны 7 заблокированы с запорным органом 4 через соединяющие их штоки 14 и тягу 15.

При работе дизеля на частоте вращения холостого хода запорный орган установлен в положение 70...80 %-ной рециркуляции ОГ. По мере увеличения нагрузки на постоянной частоте вращения коленчатого вала расход воздуха и ОГ в районе датчиков 12 и 13 в трубопроводе 1 практически неизменен, а расход ОГ в трубопроводе 2 увеличивается. Это увеличение воспринимается мембраной 7 датчика 6, которая, преодолевая сопротивление пружины, перемещает шток 14. Последний через тягу 15 прикрывает запорный орган 4, и тем самым уменьшается расход рециркулируемых ОГ через трубопровод 3.

При изменении частоты вращения коленчатого вала расходы воздуха и ОГ в трубопроводах 2 и 3 изменяются один пропорционально другому, разница перепадов давлений на мембранах 7 не изменяется, равно как и положение запорного органа 4.

Качественное отличие от приведенных имеют системы РОГ для дизелей с турбонаддувом. В соответствии с а.с. 767378 СССР к двигателю внутреннего сгорания подключен турбокомпрессор 1 (рис. 52, в), подключенный к его впускной магистрали 2, топливный насос 3 с рейкой 4, выпускной трубопровод 5. Последний для перепуска ОГ соединен с впускной магистралью 2 через трубопровод 6, в котором размещен запорный орган 7, соединенный через механизм управления 8 с датчиком 9 частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Турбокомпрессор 1 снабжен датчиком 10 частоты вращения его вала 11. Датчик 10 подключен к механизму управления 8, к которому дополнительно через упругое звено 12 подсоединена рейка 4 топливного насоса 3.

При работе двигателя в режиме холостого хода усилия от действия датчиков 9 и 10 взаимно уравновешены при открытом положении запорного органа 7. При увеличении нагрузки двигателя частота вращения турбокомпрессора возрастает, и механизм управления 8 прикрывает запорный орган 7. При больших нагрузках запорный орган 7 полностью перекрывает трубопровод.

При резком нажатии на педаль 13 движение рейки согласуется с частотой вращения коленчатого вала двигателя путем ее торможения механизмом управления 8 и упругим звеном 12.

Система обеспечивает снижение токсичности и дымности ОГ, вызываемые инерционностью турбокомпрессора.

**Комплексное снижение токсичности ОГ дизелей.** Поскольку пока еще нет единого универсального метода, обеспечивающего значительное снижение выброса с ОГ всего спектра токсичных компонентов, задача снижения токсичности ОГ может быть решена только за счет применения комплекса мероприятий, включающего в себя как средства и методы воздействия на рабочий процесс (обеспечивающие в основном эффекти-

вное снижение выброса с ОГ  $\text{NO}_x$  и сажи), так и средства физико-химической очистки ОГ (обеспечивающие в основном эффективное снижение выброса с ОГ  $\text{C}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ , а также уменьшение запаха ОГ и их слезоточивого действия) [72].

Представляет интерес изучение возможности применения комбинаций методов, обладающих относительно узким диапазоном действия как по спектру токсичных компонентов ОГ, так и по режимным параметрам дизеля. Для практики наиболее важным является определение взаимного влияния отдельных средств и методов.

Общий вид комплексной ССТ для трактора представлен на рисунке 53. Она включает в себя следующие элементы: каталитический нейтрализатор 1; жидкостный нейтрализатор 2; регулировку топливного насоса (уменьшение установочного угла опережения впрыскивания топлива, уменьшение цикловой подачи топлива на 15% и отключение корректора).

Каталитический нейтрализатор расположен в выпускном трубопроводе 3 дизеля 4 по ходу потока ОГ и поддерживается кронштейном 5.

Жидкостный нейтрализатор установлен в системе выпуска дизеля после каталитического нейтрализатора по ходу потока ОГ. Он выполнен в виде скруббера Вентури и состоит из сопла Вентури 7 с распылителем 8, камеры 9 и системы подачи воды к распылителю. Распылитель 8 представляет собой трубку с внутренним диаметром 7,5 мм, проходящую до оси сопла, которое выполнено из нержавеющей стали.

Камера 9 предназначена для расширения и торможения потока ОГ и распыленной воды с паром, конденсации последнего, накопления воды с задержанной в ней сажей до уровня, обеспечивающего барботаж в слое

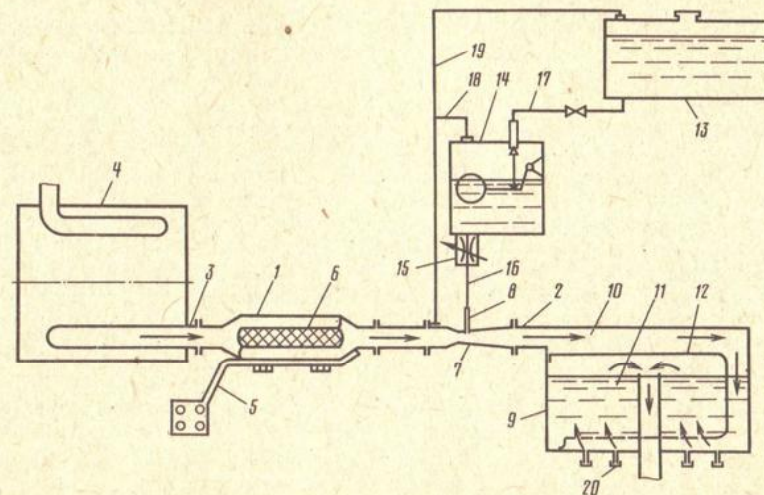


Рис. 53. Схема универсальной системы снижения токсичности ОГ дизелей

раствора. Для этого камера 9 состоит из двух полостей – расширительной 10 и накопительной 11, разделенных перегородкой 12.

Система подачи воды к распылителю 8 состоит из бака 13, поплавковой камеры 14 с дросселем 15, соединительных трубопроводов 16, 17 и трубок суфлирования 18 и 19. Последние предназначены для выравнивания давлений в баке и поплавковой камере с давлением перед соплом Вентури. Поплавковая камера поддерживает уровень воды относительно среза распылителя 8 постоянно независимо от количества воды в баке 13.

Система снижения токсичности ОГ работает следующим образом. От выпускного трубопровода двигателя ОГ поступают в каталитический нейтрализатор, в реакторе которого происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ). Затем ОГ поступают в сопло Вентури, в сужении которого скорость ОГ возрастает, а давление падает; создается разрежение относительно давления перед соплом, благодаря чему происходит подсос воды из поплавковой камеры в распылитель 8, откуда вода поступает в сужение сопла, распыливается, испаряется и смешивается с ОГ. В диффузоре сопла Вентури происходит постепенное торможение потока ОГ, его смешение с каплями и парами воды, коагуляция частиц сажи и конденсация на них паров воды. В расширительной полости 10 происходит резкое торможение смеси ОГ и капелек с парами воды, их конденсация и накопление до определенного уровня в накопительной полости 11. Решетчатая проставка перегородки 12 обеспечивает дробление потока смеси ОГ с водой, барботаж ОГ, а также улавливание коагулированной сажи с каплями и парами воды. Штуцер 20 предназначен для проверки уровня раствора в накопительной полости.

При работе тракторов в холодное время года допускается исключение из состава ССТ жидкостной ступени очистки ОГ. Ниже представлены данные по ССТ тракторов Т-25А, МТЗ-80, Т-130 и ряду других машин, разработанных ЦНИИМ.

Система снижения токсичности ОГ трактора Т-25А с дизелем Д-21А1 включает в себя: каталитический нейтрализатор Н-13; топливный насос НД-21 (уменьшение угла опережения начала впрыскивания топлива регулируется с 26 до 18 град п.к.в. до ВМТ, отключение корректора топливного насоса и дефорсаж дизеля на 15% за счет затяжки корпуса корректора). Система была установлена на двух тракторах, эксплуатируемых в совхозе "Заречье" Московской области.

Испытаниями установлено, что выброс  $\text{CO}$  снижается на 35...50%,  $\text{NO}_x$  – на 30...75%, сажи – 60...75% в зависимости от режима работы.

Установка каталитического нейтрализатора Н-13 и проведение малотоксичных регулировок топливной аппаратуры значительно снижают токсичность ОГ. При этом нейтрализатор Н-13 удовлетворительно komponуется на тракторе и не создает помех при работе в теплицах.

Аналогичные системы разработаны для самоходных шасси Т-16М и СШ-28Т, на которых устанавливается этот же дизель.

Система снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80 включает в себя каталитический нейтрализатор Н-23; возможны уменьшение угла опережения впрыскивания топлива с 26 до 20 град п. к. в., отключение корректора топливного насоса,

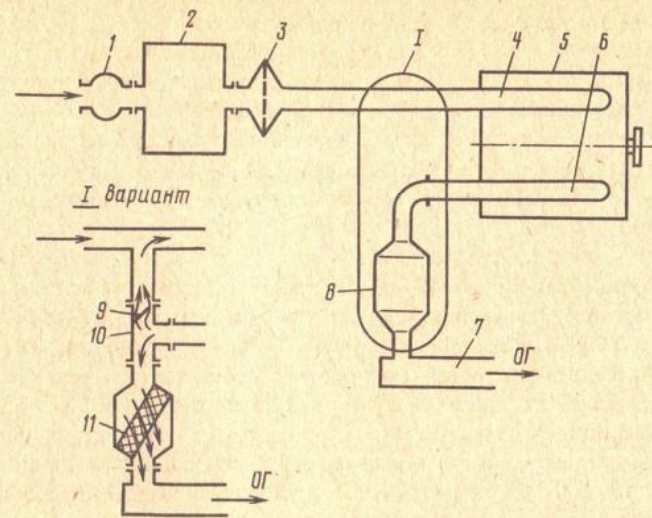


Рис. 54. Схема системы снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80:

1 – расходомер воздуха; 2 – ресивер; 3 – воздухоочиститель; 4 – впускной трубопровод; 5 – двигатель Д-240; 6 – выпускной трубопровод; 7 – выпускной трубопровод стенда; 8 – глушитель; 9 – заслонка; 10 – тройник; 11 – нейтрализатор Н-23

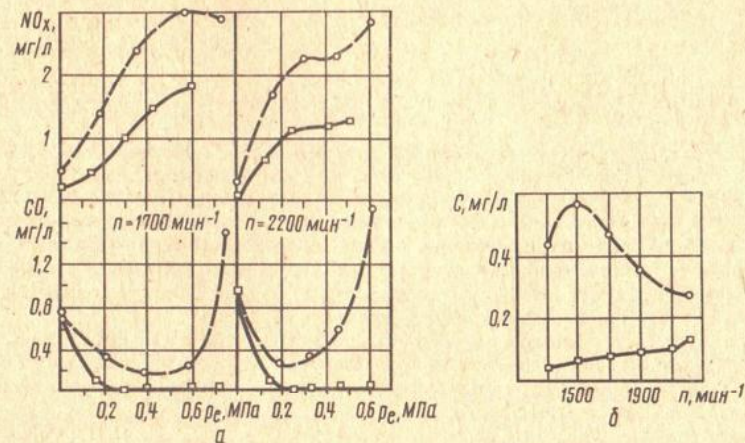


Рис. 55. Влияние системы снижения токсичности на токсичность и дымность ОГ дизеля Д-240:

а – по оксидам азота ( $\text{NO}_x$ ) и окиси углерода ( $\text{CO}$ ) в зависимости от среднего эффективного давления; б – по характеристике дымности ОГ (по внешней характеристике);  $\circ$  – без системы;  $\square$  – с системой



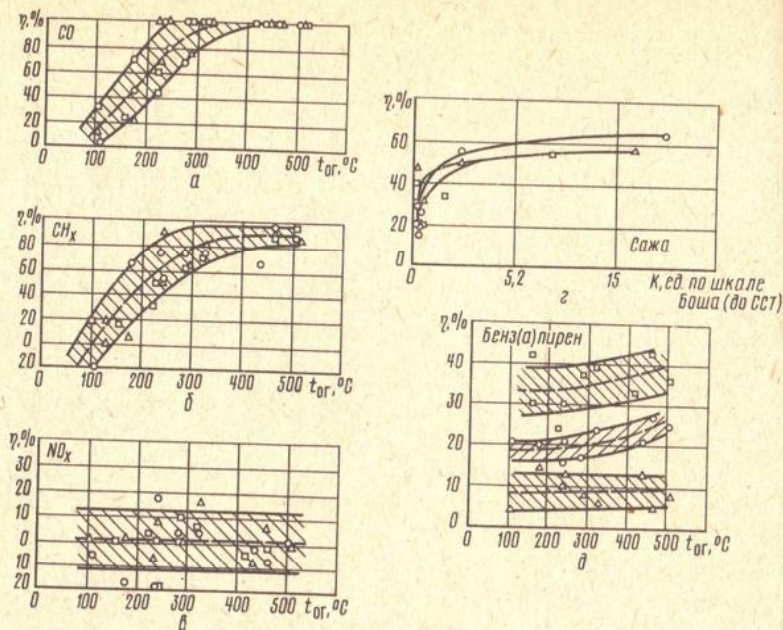


Рис. 56. Эффективность ( $\eta$ ) очистки ОГ дизеля ЯМЗ-236 с помощью комбинированной системы очистки:

*a* – по окиси углерода (CO); *б* – по углеводородам (CH<sub>x</sub>); *в* – по оксидам азота (NO<sub>x</sub>); *г* – по саже (C) в зависимости от концентрации сажи (C, мг/л); *д* – по бенз(а)пирену в зависимости от температуры ( $t_{ог}$ , °C) ОГ

дефорсаж дизеля. Она оборудована системой рециркуляции ОГ с ручным управлением, имеющим положения "Открыто" – "Закрыто" (рис. 54).

По результатам стендовых испытаний (рис. 55) было установлено, что опытный образец системы снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80 позволил уменьшить оценочные удельные выбросы NO<sub>x</sub> с 17,38 до 9,95 г/кВт (за счет уменьшения угла опережения начала впрыскивания топлива с 26 до 20 град п.к.в. и применения рециркуляции ОГ), окиси углерода – с 6,33 до 1,61 г/кВт (за счет установки КН).

Монтаж системы снижения токсичности ОГ на тракторе МТЗ-80 и проверка ее работоспособности при движении трактора без груза показали, что указанная система удовлетворительно komponуется на трактор.

Испытания системы на тормозном стенде полигона МТЗ подтвердили полученные ранее результаты.

Таким образом, разработанная система снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80 позволяет существенно уменьшить токсичность и дымность его ОГ по основным токсичным компонентам: NO<sub>x</sub>, CO и саже. В зависимости от жесткости требований по токсичности ОГ приведенная система может быть либо усложнена, либо упрощена.

В частности, при низкотемпературном ездовом цикле, что определяет малую общую эффективность работы КН, последний может быть исключен из комплек-

тации системы. При малых нагрузках двигателя в процессе эксплуатации, наоборот, целесообразно использовать каталитический нейтрализатор, можно исключить применение рециркуляции.

**Система снижения токсичности ОГ трактора Т-130.** В качестве базовой модели двигателя использован дизель Д-160В в малотоксичной модификации, которая отличается от базовой дефорсированием со 117,6 до 102,9 кВт и регулировкой угла опережения впрыскивания топлива, значение которого уменьшено с  $24 \pm 0,5$  до  $15 \dots 17$  град п.к.в. до ВМТ.

В соответствии с правилами Госгортехнадзора в систему снижения токсичности ОГ включены каталитический и жидкостный блоки очистки ОГ, устанавливаемые последовательно в системе выпуска трактора.

В качестве каталитической ступени в системе очистки ОГ использован реактор серийно выпускаемого нейтрализатора НКД-241. В качестве жидкостной ступени в системе очистки ОГ использован модифицированный вариант, включающий в себя сочетание скруббера Вентури с мокрой насадкой, являющейся одновременно каплеуловителем. Для сохранения высокой эффективности жидкостной очистки ОГ трактора Т-130 в течение всей рабочей смены в жидкостном нейтрализаторе предусмотрено использование только свежей воды, подаваемой из специального бака в сопло Вентури.

Форма и габаритные размеры комбинированной системы очистки определялись монтажной схемой установки ее на тракторе, предусматривающей неизменность габаритов трактора, его клиренса и сохранение обзорности из кабины водителя.

Результаты испытаний представлены на рисунке 56. На рисунке 56, *a* и *б* приведены зависимости степени очистки ОГ по CO и CH<sub>x</sub> от  $t_{ог}$ . Эффективность очистки ОГ по указанным компонентам определяется в основном уровнем  $t_{ог}$  и количественно совпадает с известными данными для нейтрализатора НКД-241. Очистка ОГ по NO<sub>x</sub> практически отсутствует (рис. 56, *в*).

Снижение в 2 раза выбросов NO<sub>x</sub> в комплексной ССТ обеспечено за счет уменьшения угла опережения впрыскивания топлива.

Зависимость эффективности очистки ОГ по саже от ее концентрации представлена на рисунке 56, *г*, а от БП приведена на рисунке 56, *д*.

## 9. ИСПЫТАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ НА ТОКСИЧНОСТЬ И ДЫМНОСТЬ

### 9.1. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА

Разработано много средств и методов газового анализа, позволяющих проводить количественную оценку состава газовой и твердых фаз ОГ дизелей. Для анализа ОГ применяют методы, основанные на использовании химических и физических свойств отдельных составляющих ОГ. К химическим методам анализа относится calorиметрический метод. К физическим относятся методы, использующие следующие физические свойства исследуемых индивидуальных веществ:

поглощение (абсорбция) ультрафиолетового или инфракрасного излучения исследуемой средой;

теплопроводность индивидуальных газовых компонентов, магнитная восприимчивость кислорода в отношении к тем или иным газам;

ионизация углеводородов при сгорании в пламени водородной горелки.

Разработан также метод газовой хроматографии, основанный на учете различия свойств поглощения и испарения наполнителем (сорбентом) колонки отдельных компонентов, содержащихся в ОГ при их прохождении через колонку.

Приборы газового анализа ОГ разделяются на:

приборы непрерывного анализа ОГ, поступающие непосредственно в анализатор (с обогреваемой и необогреваемой линиями отбора проб ОГ);

приборы для дискретного проведения анализа ОГ, осуществляемого путем подачи проб ОГ, предварительно отобранных в пробоотборные емкости.

Аналогично методам анализа ОГ наибольшее распространение нашли два метода отбора проб:

непрерывный при применении автоматических газоаналитических приборов непрерывного действия;

дискретный отбор в вакуумированные аспираторы при дальнейшем их анализе в неавтоматических газоаналитических приборах.

Первый метод находит все большее распространение при проведении научно-исследовательских работ в условиях стендовых испытаний дизелей. Второй, менее точный, но более дешевый и простой, широко применяется при проведении НИР и незаменим при проведении дорожных и эксплуатационных испытаний методов и средств снижения токсичности ОГ.

Требования, предъявляемые к точности измерения содержания отдельных токсичных компонентов в ОГ, весьма жесткие. Она в основном определяется погрешностями в системе отбора проб и погрешностью в анализаторе, а также условиями проведения испытаний. В системе отбора погрешность получается вследствие адсорбции и десорбции ряда токсичных компонентов, а также изменения состава ОГ в подводящих трубопроводах и самом анализаторе. Погрешность в анализаторе определяется чувствительностью применяемого анализа.

Основные методы отбора:

непосредственный отбор пробы;

отбор всего количества ОГ с помощью мешка;

пропорциональный отбор пробы;

отбор пробы с постоянным объемом (CVS).

Первый метод наиболее прост, поэтому он нашел широкое применение. При нем в выпускной трубопровод двигателя устанавливают пробоотборную трубку, отбирающую анализируемые ОГ. Перед поступлением в анализатор проба подвергается грубой очистке через фильтр, освобождается от влаги в отстойнике с температурой 5...20 °С, вновь пропускается через фильтр тонкой очистки и затем с помощью насоса подается

в анализатор. Расчеты, проводимые при непосредственном отборе пробы, достаточно сложны. Для определения весовых выбросов токсичных компонентов более эффективно использование методов непосредственного отбора. Метод имеет ряд недостатков, снижающих его точность.

Погрешности, возникающие вследствие адсорбции и десорбции анализируемого компонента в системе отбора, могут быть устранены за счет разделения системы на систему анализа низкой концентрации исследуемого вещества и систему с высокой его концентрацией, а также поддержания пробоотборных трубопроводов в диапазоне температур 70...200 °С. При измерении в ОГ дизелей углеводородов их температура должна быть выше 200 °С.

Метод отбора проб ОГ с помощью мешка положен в основу нормирования состава ОГ автомобильных двигателей в странах Европы. Этот метод наиболее прост. Для равномерного распределения ОГ в мешке их целесообразно перемешивать. Анализируют ОГ с помощью анализатора; массу каждого токсичного компонента определяют пропорционально количеству ОГ в мешке.

Метод пропорционального отбора пробы основан на отборе ОГ в количестве, пропорциональном количеству воздушного заряда, поступающего в двигатель. На входе устанавливается датчик расхода воздуха, количество отбираемых ОГ регулируется в соответствии с показаниями этого датчика. Отработавшие газы отбирают в небольшой пластиковый мешок через клапан, управляемый сервоусилителем. Регулируют клапан с помощью электрического сигнала, значение которого зависит от давления, пропорционального расходу впускного воздуха. Быстродействие системы составляет 70...80 м/с. Проба в мешке сохраняется в разбавленном состоянии, поскольку туда предварительно вводят разбавитель — азот. Общее количество поглощенного воздуха и введенной пробы ОГ интегрируется. Анализ ОГ в мешке позволяет сразу получить выбросы токсичных веществ на единицу пробега в зависимости от объема отбранной пробы. При этом методе отбор пробы происходит с обезвоживанием ОГ за счет охлаждаемой при 0 °С ловушки, поэтому происходит потеря части  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_x$ . Для обеспечения быстродействия пробоотборной системы применяют сложные электрические схемы преобразователей. Метод нашел применение в основном только для научно-исследовательских целей.

При отборе пробы с постоянным объемом (CVS) ОГ из выпускного трубопровода отбираются пробоотборником, разбавляются очищенным воздухом в постоянной пропорции к их количеству. Пропорция разбавления 8:1 и выше. Разбавляемая смесь проходит через теплообменник, на выходе из которого устанавливается постоянная температура смеси около 5...6 °С. Расход смеси поддерживается постоянным (обычно 10...15 м<sup>3</sup>/мин). Концентрация токсичных компонентов в результате пропорциональна их массе в смеси. Точность метода зависит от точности замера расхода ОГ. В результате разбавления при использовании этого

метода не потребуется установки охладителя, что устраняет погрешности, связанные с конденсацией отдельных компонентов и растворением других в конденсате. Также значительно снижается изменение состава ОГ в пробоотборной системе. Все это значительно увеличивает точность. Для анализа пробу с помощью насоса отбирают из смеси в количестве, пропорциональном расходу ОГ. В США этот метод принят за основу.

Для анализа ОГ применяются различные анализаторы в зависимости от предъявляемых требований к чувствительности анализа, его точности и селективности. Наибольшее распространение нашли способы:

*NDIR* (анализ недисперсными инфракрасными лучами);

*NDUV* (анализ ультрафиолетовыми лучами);

*FID* (ионизация пламенем водорода);

*CLD* (анализ за счет люминесценции);

*FNDIR* (анализ флуоресцентными недисперсными инфракрасными лучами);

*UVE* (анализ ультрафиолетовым измерением);

*R - FID* (анализ ионизацией восстанавливающего водородного пламени).

Это в основном оптические методы анализа. Принцип их действия заключается в избирательном поглощении компонентами отработавших газов лучистой радиации в инфракрасной, ультрафиолетовой или видимой областях спектра. Концентрация каждого компонента в результате определяется пропорционально степени поглощения лучистой радиации.

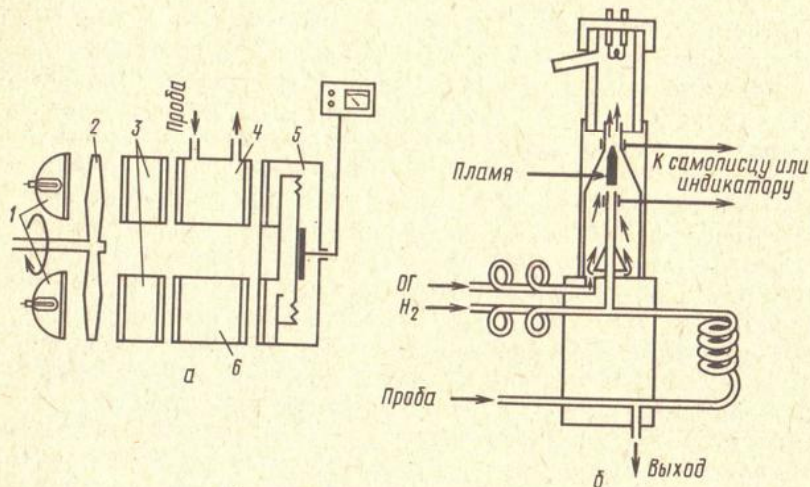


Рис. 57. Схемы газоанализаторов:

*а* — недисперсный инфракрасный анализатор (*NDIR*); *б* — пламенно-ионизационный анализатор (*FID*)

В частности, при работе газоанализатора по способу *NDIR* область поглощения  $CO$  длины волн  $4,5 \dots 5,0$  мкм в инфракрасной области спектра. Инфракрасное излучение от вдух одинаковых источников света 1 (рис. 57, *а*) через обтюратор 2, кювет-фильтры 3 попадает в две отдельные одна от другой кюветы 4 и 5, из которых сравнительная 4 заполнена инертным газом (азотом), а измерительная 5 — отработавшими газами. Поглощение энергии излучения приводит к нагреву ОГ в камерах детектора 6, а так как они герметичны, то в результате повышения давления в одной из них прогибается диафрагма. Прогиб прямо пропорционален концентрации измеряемого вещества в ОГ.

Оптическая схема спектрофотометра *NDUV* на основе ультрафиолетового излучения идентична рассмотренной схеме. Различие только в качественном и конструкционном оформлении отдельных деталей.

Анализ по способу *FID* осуществляется автоматическим газовым хроматографом (рис. 57, *б*), в котором при введении водорода в поток ОГ с наличием  $CH_x$  в пламени водорода образуются пропорциональные количеству  $CH_x$  ионы, поступающие к положительному электроду, что и фиксируется показывающим прибором.

Основной метод определения  $CO$  — *NDIR*. Для этого же применяют и методы *FNDIR*, *UVE* и *R - FID*. Способ *NDIR* применим для всех стандартов на ОГ и используется, например, в измерительной аппаратуре, рекомендуемой стандартом США и правилами 15 ЕЭК ООН. По чувствительности и селективности *NDIR* и *R - FID* превосходят *FID*. Другие методы являются упрощенными.

Наиболее точный (точнее в  $1,8 \dots 2,5$  раза) способ определения углеводородов — *FID*. С 1972 г. этот способ стали использовать для нормирования содержания в ОГ углеводородов. Он применяется в США (в штате Калифорния). Для анализа углеводородов разработаны следующие модели газоанализаторов: по методу *NDIR* — "Бекман 15/В", "Хориба (LL) A1A-2", по методу *FID* — "Бекман 109", "Хориба F1A".

Для определения концентрации  $NO$  и  $NO_x$  широкое распространение получили соответственно методы *NDIR* и *NDUV*. При определении  $NO_x$  как суммы  $NO + NO_2$  эти концентрации складываются. Для оценки  $NO_x$  находит применение и метод *CLD*, который исключает интерференционное влияние. В штате Калифорния (США)  $NO_x$  определяют по способу *NDIR*, а по федеральным положениям США — по способу *CLD*. Газоанализаторы для определения оксидов азота в ОГ выпускают следующие фирмы: "Хориба" ("Мекса-77", "Мекса-2000", *CLA-11*), "Янако", "Рикен" (модель *RS-325*), "Стек" (*SGCM-18*), "Янагимота" (*EIEC-88*) в Японии, а также "Бекман", "Скотт" (модель 125) в США.

Для определения содержания БП и альдегидов в ОГ применяют специфические способы, которые в большинстве своем имеют большую погрешность.

Для проведения исследовательских работ ряд фирм выпускает комплексные анализаторы ОГ с анализом следующих компонентов: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>x</sub>, NO и NO<sub>x</sub>. Такими анализаторами, в частности, являются "Мекса-77", EIEC-88, "Бекман" модели 951 и ряд других. Это в основе своей быстродействующие газоанализаторы со скоростью срабатывания (96 %) около 1...2 с, позволяющие анализировать ОГ на установившихся и неустановившихся режимах работы двигателя, снабжены самописцами.

Для анализа ОГ находят применение и хроматографы, с помощью которых определяют практически все токсичные компоненты ОГ. Их недостатки: невозможность непосредственного и непрерывного анализа, трудоемкость анализа. Хроматографы не позволяют проводить анализ ОГ на неустановившихся режимах.

При измерении токсичности ОГ тракторных и комбайновых дизелей по ОСТ 23.1.440-76, ГОСТ 17.2.2.05-86 и ГОСТ 18509-80 отбор и анализ ОГ должны производиться при применении автоматических газоаналитических приборов непрерывного действия:

по CO — недисперсным инфракрасным газоанализатором (NDIR);  
по CH<sub>x</sub> — пламенно-ионизационным газоанализатором (FID);  
по NO<sub>x</sub> — хемиллюминесцентным газоанализатором (CLD) или недисперсным инфракрасным (NDIR) и недисперсным ультрафиолетовым газоанализатором (NDUV).

При применении неавтоматических газоанализаторов для анализа CO используют хроматограф "Газохром-3101" с термохимическим детектором, при анализе CH<sub>x</sub> — хроматограф "Цвет-101" с пламенно-ионизационным детектором, при анализе NO<sub>x</sub> — фотокалориметр ФЭК-3М в сочетании с химическим определением по реакции с реактивом Зальцмана.

Данные по ряду применяемых в СССР и за рубежом газоанализаторов перечислены в таблице 24.

При анализе альдегидов в ОГ первоначально применялся весовой метод. Для этого ОГ пропускали через скрубберы с раствором 2,4-динитрофенилгидразина (ДНФГ). Содержание альдегидов рассчитывалось по привесу на фильтре при пропускании через него раствора образовавшегося количества 2,4-ДНФГ. Существенный недостаток при этом — длительность анализа.

В ЦНИИМе разработан один из наиболее точных методов анализа альдегидов в ОГ тракторных дизелей [30].

Анализ бенз(а)пирена по методике Института экспериментальной и клинической онкологии (ИЭКО) АМН СССР проводится методом экстракции БП из фильтров [31].

Разработано несколько методов определения дымности ОГ, которые основаны либо на измерении степени поглощения светового потока столбом газа заданной длины, либо степени отражения света поверхностью фильтра, покрытой сажей.

24. Основные данные применяемых для анализа ОГ газоанализаторов

| Модель (страна)        | Измеряемый компонент                        | Метод измерения      | Диапазон измерения, % по объему  | Погрешность (относительная) | Примечание                 |
|------------------------|---|----------------------|--|-----------------------------|----------------------------|
| 0А-5501 (СССР)         | CO  | NDIR                 | 0...0,5  | 10                          | Стационарный               |
| "Инфралит-Т" (ГДР)     | CO  | NDIR                 | 0...10   | 5                           | Переносной                 |
| "Бекман 895" (США)     | CO  | NDIR                 | 0,1...100  | 1                           | Стационарный               |
| "Бекман 1R-2158" (США) | CO  | NDIR                 | 0,1...100  | 1                           | "                          |
| "Мекса-300" (Япония)   | CO, CH <sub>x</sub>                         | NDIR                 | 0...2<br>0...8   | 2<br>2                      | Переносной                 |
| "Мекса-400" (Япония)   | CO,<br>CH <sub>x</sub> ,<br>NO <sub>x</sub> | NDIR<br>NDIR<br>NDIR | 0...0,1<br>0...0,5<br>0...10   | 2<br>2<br>2                 | Передвижной                |
| "Мекса-2000" (Япония)  | CO,<br>CH <sub>x</sub> ,<br>NO <sub>x</sub> | NDIR<br>NDIR<br>CLD  | 0...10 <sup>-3</sup><br>0...2·10 <sup>-3</sup><br>0...2·10 <sup>-3</sup> | 2<br>2<br>2                 | Газоаналитический комплекс |
| EH-100 (Япония)        | CH <sub>x</sub>                             | FID                  | 0...10<br>0...5·10 <sup>-3</sup>   | 1<br>1                      | То же                      |
| HC-101 (Япония)        | CH <sub>x</sub>                             | FID                  | 0...5·10 <sup>-3</sup>   | 0,5                         | "                          |
| "Бекман 951" (США)     | NO <sub>x</sub>                             | CLD                  | 0...0,01   | 0,5                         | "                          |
| CAH 1020/1120 (США)    | CO,<br>CH <sub>x</sub>                      | NDIR<br>NDIR         | 0...10<br>0...2·10 <sup>-3</sup>   | 5<br>5                      | Диагностический комплекс   |

Существующие приборы-дымомеры первой группы выпускаются различными странами. К ним можно отнести следующие: "Бош" (ФРГ), "Фон Бранд" (США), ИД-1 конструкции НАМИ (СССР), "ЛАНЭ-35/300" конструкции Ланэ (СССР), NC-112 (ЧСФР), AVL (Австрия).

Дымомеры второй группы также широко известны: "Хартридж" (Англия), "Волво" (Швеция), "Утак" (Франция), "Мерлин" (Англия), KDM-4 (ГДР) и др.

Наибольшее распространение получили дымомеры "Бош" и "Хартридж".

**Дымомер "Бош".** Проба ОГ объемом 330 см<sup>3</sup> отбирается из выпускного трубопровода двигателя насосом-дозатором через пробоотборник 4 (рис. 58). Покрытый сажей фильтр помещается в измерительный прибор, где освещается источником света, отражение которого от фильтра регистрируется фотоэлементом. Количество света, отраженного рабочей поверхностью фильтра, таким образом, преобразуется в фототок, регистрируемый микроамперметром, имеющим показывающую шкалу, градуированную в единицах шкалы Боша.

Такие дымомеры не дают высокой точности измерения, но они весьма удобны при измерении, компактны и могут применяться не только в условиях стендовых испытаний, но и на машинах в условиях эксплуатационных испытаний.

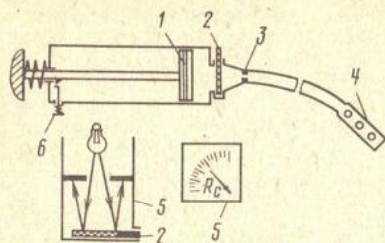


Рис. 58. Схема дымомера типа "Бош":  
1 – насос; 2 – фильтр; 3 – дросселирующее отверстие; 4 – пробоотборник; 5 – анализирующий прибор; 6 – фиксатор поршня

**Дымомер "Хартридж".** Для измерения дымности ОГ в дымомерах типа "Хартридж" используется зависимость Броуна между оптической плотностью ОГ и интенсивностью источника света:

$$D = \frac{k}{K} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (47)$$

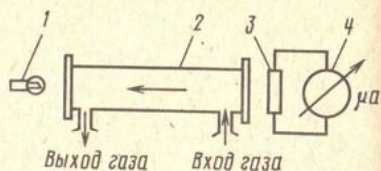
где  $D$  – плотность дыма;  $I_0$  – интенсивность источника света;  $I$  – регистрируемая интенсивность света;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $K$  – постоянная прибора, равная длине столба дыма, при которой происходит поглощение света.

Пробоотборник дымомера "Хартридж" выполнен в виде трубки с внутренним диаметром, составляющим 5% диаметра выпускного трубопровода, которая направлена против движения ОГ. Для снижения влияния пульсации ОГ в выпускном трубопроводе до пробоотборника устанавливают ресивер.

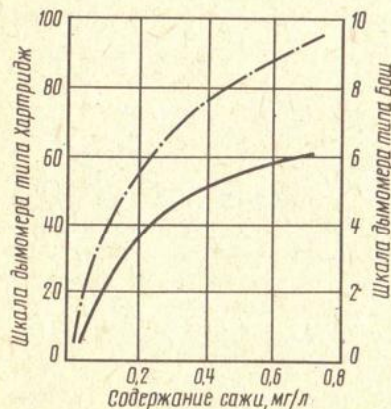
Во время испытаний для увеличения точности измерения в системе отбора с помощью дроссельной заслонки 7 создают избыточное давление  $\Delta p$  в измерительной камере от 50 до 75 мм вод.ст., а температуру газа поддерживают на уровне 70 °С, для чего предусмотрено водяное охлаждение отбираемых для измерения ОГ.

Рис. 59. Схема измерения дымности отработавших газов методом просвечивания (типа "Хартридж"):

1 – источник света; 2 – измерительная кювета; 3 – фотозэлемент; 4 – измерительный прибор



1 – источник света; 2 – измерительная кювета; 3 – фотозэлемент; 4 – измерительный прибор



Дымность при этом оценивается по оптической плотности ОГ при их просвечивании. Высота столба измерительного участка составляет около 0,5 м.

Рис. 60. Соотношение показателей сажевого содержания, измеренного дымомерами типа "Бош" и "Хартридж":

--- "Хартридж"; — "Бош"

Схема прибора "Хартридж" дана на рисунке 59. Это двухканальная оптическая система, в один из которых подают очищенные в золо- и водоотделениях ОГ, а в другой – чистый воздух, служащий для калибровки и тарировки прибора. Источником света является лампа накаливания с цветовой характеристикой 2800...3250 К. В качестве приемника света применен фотозэлемент. Прибор имеет равномерную шкалу измерения, разделенную на 100 единиц. Перед измерением прибор тарируют, устанавливая специальный фильтр перед фотозэлементом, имеющим известные характеристики светопоглощения. Преимуществом дымомера типа "Хартридж" является непрерывность измерения, т.е. этими дымомерами можно пользоваться при работе двигателя на неустановившихся режимах.

Характеристики различных типов дымомеров значительно отличаются одна от другой, шкалы их тоже различны. Соотношения показаний некоторых наиболее распространенных дымомеров даны на рисунке 60.

## 9.2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Общие сведения.** При проведении экспериментальных исследований ДВС с целью изыскания наиболее оптимальных параметров объекта или процесса все шире применяют математическое планирование эксперимента [32, 33, 34]. Под оптимальностью необходимо понимать получение наилучших результатов в конкретных условиях.

Задачи, решаемые исследователями, можно объединить в три основных вида: выявление количественных зависимостей между параметрами объекта или процесса; отыскание оптимальных параметров ДВС и протекания процессов в них; выбор оптимального состава топливовоздушных смесей и т.д. Задачи первого вида называются *интерполяционными*, а второго и третьего – *экстремальными*. Первые требуют отыскания лишь зависимости между параметром оптимизации и факторами, влияющими на него; вторые – отыскания экстремума функции, описывающей с достаточной точностью объект или процесс.

С одной стороны, шлайрование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью; с другой – это средство построения математических моделей различных процессов, позволяющее сократить время, сэкономить средства и обеспечить повышение производительности труда исследователя.

Планирование эксперимента заключается в выборе стратегии экспериментирования, которая позволяет принимать обоснованные решения после каждой серии опытов. Оно позволяет определить заранее схему шагового процесса проведения эксперимента, включить в него минимальное число опытов при одновременном варьировании всеми факторами без снижения количества и качества полученной информации.

**Факторным экспериментом** называется эксперимент, в котором для изучения процесса одновременно варьированию подлежат несколько факторов. В сложном факторном эксперименте уровни одного фактора пересекаются с уровнями всех остальных. Под уровнем фактора подразумевают значения его величины, которые принимают при варьировании

в эксперименте. *Фактором* называют независимую переменную величину, которая влияет на значение результата опыта. Формально цель эксперимента — это определение численных значений коэффициентов уравнения регрессии. Для определения оптимальных условий протекания процессов находят значения факторов, соответствующих экстремуму функции, именуемой еще *функцией цели*, или *целевой функцией*.

**Выбор критериев оптимизации.** Перед планированием и проведением экспериментов необходимо правильно выбрать критерий оптимизации, т.е. параметр, по которому оценивается исследуемый объект. Существенную роль при выборе критериев оптимизации играет уровень априорных сведений об объекте исследования.

Правильно выбранный критерий оптимизации позволяет исследователю четко сформулировать цель работы. Тогда становится возможным при создании математической модели минимизировать или максимизировать критерий оптимизации путем подбора факторов, действующих на изучаемый объект. В качестве критерия оптимизации могут быть выбраны показатели эффективности мощности, экономичности, токсичности и дымности ОГ и т.д. [35, 36, 37].

Необходимо стремиться к тому, чтобы критерий оптимизации был один, имел четкий физический смысл и количественную оценку, являлся бы совокупной и исчерпывающей характеристикой объекта исследований. Для того чтобы проранжировать критерии оптимизации по степени важности в сравнительном ряду и наиболее важному присвоить больший вес, пользуются экспертными оценками. Однако экспертные оценки могут быть чрезмерно субъективными, и к определению нормированного веса косвенным путем можно подойти через так называемую функцию эффективности.

В более сложных исследованиях процессов, протекающих в ДВС, можно выбрать два-три критерия оптимизации, но при этом возникают осложнения с анализом результатов, так как придется решать комприссную задачу. Кроме того, это требует, как правило, постановки большого числа опытов. В общем случае выбор критерия оптимизации полностью определяется условиями объекта исследования, его особенностями, возможностями экспериментальной установки и интуицией исследователя.

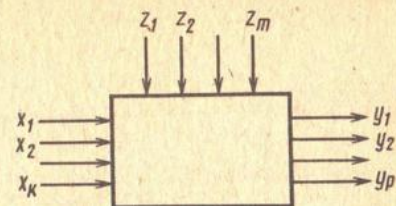
**Выбор факторов.** При формализации объекта исследования важно установить то число различных его состояний, которые способны оптимизировать критерий.

Фактором называется измеримая переменная величина, принимающая в некоторый момент определенное значение и соответствующая одному из возможных способов воздействия на объект исследования.

Моделью для критерия оптимизации, основанной на принципе *оптимального управления возможно при неполной информации*, может служить модель "черного ящика". Схема черного ящика приведена на рисунке 61. Объект исследования — прямоугольник. Выходы (обозначены

Рис. 61. Схема "черного ящика":

$x_1, x_2, \dots, x_k$  — управляемые факторы;  
 $z_1, z_2, \dots, z_m$  — неуправляемые факторы;  
 $y_1, y_2, \dots, y_p$  — критерии оптимизации



стрелками, выходящими из объекта) соответствуют критериям оптимизации. Стрелки, входящие в объект (входы), показывают возможные способы воздействия на объект. Входы и будут называться факторами. Факторы могут быть управляемыми и неуправляемыми. Их выбор основывается на априорной информации. Исследователю необходимо с помощью факторов получить различные состояния объекта. Черный ящик с пятью входами, каждый из которых имеет только два различных состояния, содержит  $2^5 = 32$  различных состояний.

Факторы также могут быть количественные и качественные. Количественные можно измерить и выразить в числах, качественные факторы можно условно закодировать. Факторы должны быть управляемыми и непосредственно воздействовать на объект. Под управляемостью понимают возможность установки и поддержания выбранного уровня фактора постоянным в течение всего опыта или его изменение по заданной программе. Суть требования непосредственного воздействия на объект заключается в том, что нужно выбирать такие факторы, которые бы сами не были функциями других факторов.

Если в факторном эксперименте одновременно изменяется несколько факторов, то необходимо выполнять еще два условия: совместимость и независимость факторов. Под совместимостью факторов подразумевается осуществимость и безопасность всех запланированных комбинаций факторов, а под независимостью — возможность установления факторов на любом уровне независимо от других уровней.

**Применение теории планирования эксперимента для оценки токсичности ОГ дизелей.** В работе [38] применено планирование эксперимента с помощью латинского квадрата. Испытания проводились на макетном образце насоса, который позволял реализовать постоянное и управляемое начало впрыскивания на одном и том же насосном элементе. В качестве основных факторов, влияющих на токсичность ОГ были выбраны нагрузка, установочный угол опережения впрыскивания топлива и частота вращения.

Результаты факторного эксперимента, представленные на рисунке 62, являются усредненными. Графически показано влияние на содержание в ОГ  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$ , режимных факторов при работе дизеля Д-37Е на различных режимах. С помощью характеристик можно оценить систему топливоподачи с различными углами начала впрыскивания.

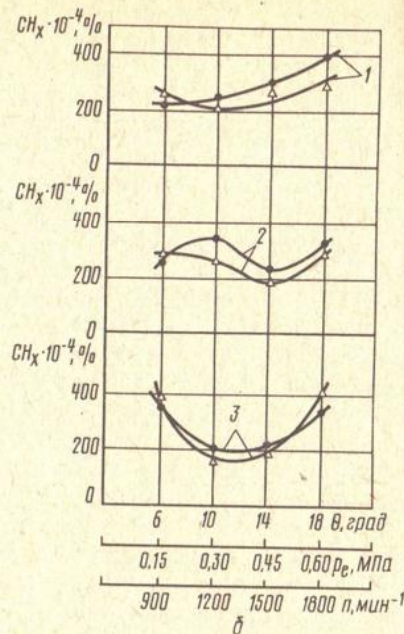
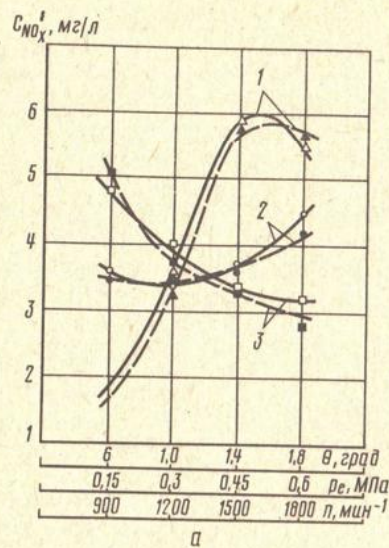


Рис. 62. Токсические характеристики дизеля Д-37Е (усредненные кривые выхода в ОГ):

$\alpha$  —  $\text{NO}_x$ ;  $\beta$  —  $\text{CH}_x$  в функции; 1 — среднего эффективного давления; 2 — установочного угла опережения впрыскивания топлива; 3 — частоты вращения;  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  и  $\blacksquare$  — постоянное начало подачи;  $\circ$ ,  $\Delta$  и  $\square$  — переменное начало подачи

Применение симплекс-решетчатого планирования эксперимента для оценки токсичности ОГ дизелей. Для решения задачи по выбору оптимальных соотношений топливовоздушных смесей в ДВС возможно применение диаграмм состав — свойство. Если в общем случае при применении методов планирования экстремальных экспериментов учитываются в первую очередь режимные факторы (частота вращения, установочный угол опережения начала впрыскивания топлива, среднее эффективное давление), то для получения объективной характеристики необходимо изучить влияние состава топлива (смеси топлив) на основные показатели ДВС (мощность, токсичность ОГ) вне зависимости от режимных факторов. Для снижения токсичности ОГ необходимо с помощью симплекс-решетчатых планов Шеффе при исследовании диаграмм состав — свойство определить соотношения подаваемых в цилиндры ДВС топлив.

При изучении свойств смеси, зависящих только от концентрации ее компонентов, факторное пространство представляет собой правильный симплекс. В этом случае для любой точки области исследований должно выполняться условие нормировки [39, 40]:

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1, x_i \geq 0, i = 1, \dots, q, \quad (48)$$

где  $x_i$  — концентрация компонентов;  $q$  — их число.

Так как сумма долей всех компонентов, составляющих смесь, всегда равна единице, то факторное пространство может быть представлено для трех компонентов правильным треугольником. Каждая точка треугольника соответствует одному определенному составу тройной системы и, наоборот, каждый состав представляется одной определенной точкой. Состав смеси может быть выражен в мольных, массовых объемных долях или процентах. При планировании эксперимента для решения задач на диаграммах состав — свойство предполагается, что изучаемое свойство является непрерывной функцией аргументов и может быть с достаточной точностью представлено полиномом.

При применении симплекс-решетчатых планов Шеффе обеспечивается равномерный разброс экспериментальных точек по  $(q-1)$ -мерному симплексу. Экспериментальные точки представляют  $(q, n)$ -решетку на симплексе, где  $n$  — степень полинома. Степень полинома выбирают в соответствии с принципом шагового поиска. На каждом шаге проверяется адекватность получаемой модели, и при необходимости переходят к модели более высокого порядка.

Коэффициенты полиномов получают, используя свойство насыщенности плана: число экспериментальных точек в нем равно числу оцениваемых параметров в уравнении регрессии. В общем случае для  $q$ -компонентной смеси полином неполного третьего порядка имеет вид [39]:

$$y = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j < q} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \beta_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (49)$$

$$\text{где } \beta_i = y_i; \beta_{ij} = 4y_{ij} - 2y_i - 2y_j; \beta_{ijk} = 27y_{ijk} - 12(y_{ij} + y_{ik} + y_{jk}) + 3(y_i + y_j + y_k).$$

Полином неполного третьего порядка для трехкомпонентной смеси имеет вид [39]:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (50)$$

где  $\beta_1 = y_1$  и т.д.;  $\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2$  и т.д.

$$\beta_{123} = 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3).$$

При одинаковом числе параллельных опытов на каждом сочетании

уровней фактора воспроизводимость процесса проверяется по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_u^2 \max}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq G_{0,05; f_n; f_u} \quad (51)$$

где  $S_u = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - y_u)^2}{m - 1}$  — дисперсия, характеризующая рассеяние результатов

опытов на сочетании  $u$  уровней факторов;  $p = 1, 2, \dots, m$  — число параллельных опытов;  $S_u^2 \max$  — наибольшая из дисперсий в строках плана;  $G_{0,05; f_n; f_u}$  — таблич-

ное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости;  $f_n = n$  — число независимых оценок дисперсий воспроизводимости;  $f_u = m - 1$  — число степеней свободы каждой оценки.

Процесс считается воспроизводимым, если неравенство выполняется. При этом дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S_y = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} \quad (52)$$

После определения коэффициентов уравнения регрессии необходимо провести статистический анализ полученных результатов, т.е. проверить адекватность уравнения. Для этого ставят опыты в дополнительных точках. Число точек и их координаты связаны с постановкой задачи и особенностями эксперимента. Для каждой проверочной точки строится  $t$  — статистика, критическая область для каждой точки определяется по уровню значимости  $p/2k$ , где  $k$  — число проверочных точек, а  $p$  — уровень значимости. Величина

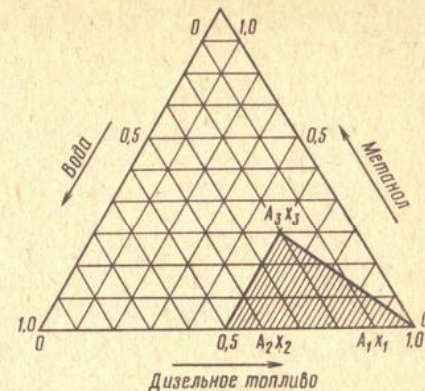
$$t = \frac{\Delta y \sqrt{n}}{S_y \sqrt{1 + \xi}} \quad (53)$$

где  $\Delta y = |\bar{y}_{\text{эсп}} - \bar{y}_{\text{расч}}|$ ;  $n$  — число параллельных опытов в каждой точке;  $S_y$  — среднее квадратическое отклонение;  $\xi$  — величина, зависящая только от состава смеси.

Для трехкомпонентных смесей значения  $\xi$  представлены графически проекциями линий уровня на симплекс [39]. Величину  $t$ , распределенную по закону Стьюдента, сравнивают с табличным значением  $t_{p/2k}(f)$ , где  $f$  — число степеней свободы дисперсии воспроизводимости. Гипотеза об адекватности уравнения принимается, если  $t_{\text{эсп}} < t_{\text{табл}}$  для всех контрольных точек.

При изучении диаграмм состав — свойство  $q$ -компонентных смесей

Рис. 63. Расположение триангулированных компонентов и область экспериментирования (заштрихованный участок) при подаче метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1



возникает необходимость исследовать зависимость свойства от состава не во всей области изменения концентраций компонентов ( $0 \leq x_i \leq 1$ ), а в локальном участке диаграммы ( $0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i \leq 1$ ;  $i = 1, 2, \dots, q$ ).

Если исследуемая область — симплекс, то локальная область на диаграмме может быть представлена неправильным симплексом, координаты вершин которого известны. Для того чтобы в этом случае было возможно применить планы Шеффе, проводят перенормировку и принимают составы в вершинах  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  за самостоятельные псевдокомпоненты так, чтобы для всей области локального симплекса выполнялось условие [48].

В Кировском СХИ проведены экспериментальные исследования по влиянию подачи (с помощью карбюратора) метанола и воды во впускной трубопровод на мощностные показатели и токсичность ОГ тракторного дизеля воздушного охлаждения Д-21А1 (2Ч 10,5/12) с планированием эксперимента по симплекс-решетчатому плану Шеффе при исследовании локальных участков диаграмм состав — свойство. Задачей исследования было оценить совместное влияние токсичных компонентов воды и ДТ на мощность и содержание основных токсичных компонентов в ОГ дизеля для выбора наиболее приемлемых составов смесей. Эксперимент проводился при частоте вращения коленчатого вала дизеля 1800 мин<sup>-1</sup>. Установочный угол опережения начала впрыскивания топлива устанавливался оптимальным для дизельного процесса и составлял 30 град п.к.в. [41].

Расположение триангулированных компонентов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и область экспериментирования представлены на рисунке 63.

На локальный участок и область экспериментирования по физически и технически приемлемым соотношениям компонентов накладывались следующие ограничения.

По ДТ: 100% (1,0) — осуществимо, 75% (0,75) — осуществимо, 50% (0,5) — осуществимо, 0% (0) — неосуществимо.

По метанолу: 100% (1,0) — неосуществимо, 75% (0,75) — неосуществимо, 50% (0,5) — неосуществимо, 30% (0,3) — осуществимо, 0% (0) — осуществимо.

По воде: 100% (1,0) — неосуществимо, 75% (0,75) — неосуществимо.



мо, 50% (0,5) — осуществимо, 25% (0,25) — осуществимо, 0% (0) — осуществимо.

В общем случае границы локального участка диаграммы были следующие:  $50\% < ДТ < 100\%$ ;  $0 < \text{метанол (М)} < 30\%$ ;  $0 < \text{вода (В)} < 50\%$ . Нижняя грань локального симплекса в натуральных переменных позволяет изменить концентрацию ДТ от 0,5 до 1,0. Правая грань локального симплекса в натуральных переменных позволяет изменить концентрацию метанола от 0 до 0,3. Левая грань локального симплекса позволяет изменить концентрацию воды в смеси от 0 до 0,5.

Переход от натуральных переменных к кодовым и обратно проводился путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} ДТ &= 100x_1 + 50x_2 + 50x_3; \\ В &= 50x_2 + 20x_3; \\ М &= 30x_3. \end{aligned} \quad (54)$$

Составы триангулированных компонентов представлены в таблице 25. Матрица плана Шеффе и условия опыта для модели неполной третьей степени представлены в таблице 26.

25. Состав триангулированных компонентов при работе дизеля с подачей метанола и воды на впуске

| Фактор | Состав смеси, %        |             |          |
|--------|------------------------|-------------|----------|
|        | дизельное топливо (ДТ) | метанол (М) | вода (В) |
| $x_1$  | 100                    | 0           | 0        |
| $x_2$  | 50                     | 50          | 0        |
| $x_3$  | 50                     | 20          | 30       |

Для уменьшения влияния внешних неконтролируемых факторов последовательность проведения опытов была рандомизирована во времени с помощью таблицы случайных чисел. Результаты опытов и значение дисперсий в точках даны в таблице 27.

Для дизеля Д-21А1 при подаче метанола и воды на впуске по результатам экспериментальных данных определены коэффициенты полиномов и получены следующие уравнения:

$$N_c = 21,12x_1 + 10,92x_2 + 14,94x_3 - 12,96x_1x_2 - 2,76x_1x_3 + 25,32x_2x_3 - 4,5x_1x_2x_3 \quad (\text{кВт}); \quad (55)$$

$$NO_x = 3,703x_1 + 2,690x_2 + 2,426x_3 - 5,586x_1x_2 - 3,726x_1x_3 + 0,752x_2x_3 + 3,009x_1x_2x_3 \quad (\text{мг/л}); \quad (56)$$

26. Матрица плана Шеффе и условия опытов для модели неполной третьей степени

| Номер опыта | Индекс отклика | Матрица планирования |     |     | Состав смеси, % |       |    |
|-------------|----------------|----------------------|-----|-----|-----------------|-------|----|
|             |                |                      |     |     | ДТ              | В     | М  |
| 1           | $y_1$          | 1                    | 0   | 0   | 100             | 0     | 0  |
| 2           | $y_2$          | 0                    | 1   | 0   | 50              | 50    | 0  |
| 3           | $y_3$          | 0                    | 0   | 1   | 50              | 20    | 30 |
| 4           | $y_{12}$       | 0,5                  | 0,5 | 0   | 75              | 25    | 0  |
| 5           | $y_{13}$       | 0,5                  | 0   | 0,5 | 75              | 10    | 15 |
| 6           | $y_{23}$       | 0                    | 0,5 | 0,5 | 50              | 35    | 15 |
| 7           | $y_{123}$      | 1/3                  | 1/3 | 1/3 | 66,67           | 23,33 | 10 |

$$CH_x = 0,112x_1 + 0,0173x_2 + 0,0250x_3 - 0,2198x_1x_2 - 0,162x_1x_3 + 0,0194x_2x_3 + 0,6435x_1x_2x_3 \quad (\text{мг/л}); \quad (57)$$

$$C = 7,966x_1 + 3,450x_2 + 2,966x_3 - 12,3x_1x_2 - 0,4x_1x_3 + 10,032x_2x_3 + 6,812x_1x_2x_3 \quad (\text{ед. по шкале Боша}); \quad (58)$$

$$CO = 0,756x_1 + 0,038x_2 + 0,228x_3 - 1,168x_1x_2 - 1,108x_1x_3 + 0,224x_2x_3 + 2,682x_1x_2x_3 \quad (\%). \quad (59)$$

Результаты статистического анализа и проверки адекватности полученных уравнений приведены в таблице 28. Проверка показала, что процесс воспроизводим, а полученные уравнения неполного третьего порядка адекватны.

Зависимости трехкомпонентных смесей от их состава по уравнениям (55)...(59) показаны на рисунке 64 изолиниями в барицентрических координатах треугольной диаграммы состав — свойство. Изолинии построены графоаналитическим способом с использованием ЭВМ "Наири-2" по методике [39, 40].

Анализ полученных диаграмм состав — свойство позволяет сделать вывод о сложности протекающих в цилиндрах дизеля процессах при изменении соотношений совместно подаваемых на впуске метанола и воды, а также изменения количества подаваемого ДТ.

Так, при изменении подачи метанола и воды на впуске и ДТ в кодовых переменных от 0 до 1 (рис. 64, а) мощность дизеля меняется в пределах от 12 до 20 кВт. При этом можно отметить существенные отличия в составах смесей при получении одного и того же диапазона мощности. Площадь диаграммы, соответствующая мощности выше 17 кВт, образует сложную конфигурацию (заштрихованный участок на рисунке 64, а). Состав смесей получился следующий:

$$\begin{aligned} \text{в точке } a: & \text{ ДТ} - 0,8; \text{ М} - 0,1; \text{ В} - 0,1; \\ \text{в точке } б: & \text{ ДТ} - 0,6; \text{ М} - 0,3; \text{ В} - 0,1; \end{aligned}$$

## 27. Результаты опытов и значение дисперсий в точках

| Индекс отклика | Параметры оптимизации (в скобках даны значения $S^2_{ii}$ ) |                |                   |                  |
|----------------|---|----------------|-------------------|------------------|
|                | $N_e$   | $NO_x$         | $CH_x$            | $C$              |
| $Y_1$          | 21,12 (0,0108)  | 3,703 (0,0272) | 0,1120 (0,000163) | 7,966 (0,063334) |
| $Y_2$          | 10,92 (0,0108)  | 2,690 (0,0144) | 0,0173 (0,000046) | 3,450 (0,157500) |
| $Y_3$          | 14,94 (0,0324)  | 2,426 (0,0477) | 0,0250 (0,000028) | 2,966 (0,003334) |
| $Y_{12}$       | 12,78 (0,0324)  | 1,800 (0,8240) | 0,0097 (0,000025) | 2,633 (0,100833) |
| $Y_{13}$       | 17,34 (0,396)   | 2,133 (0,0072) | 0,0280 (0,000039) | 5,366 (0,003334) |
| $Y_{23}$       | 19,26 (0,324)   | 2,746 (0,014)  | 0,0260 (0,000061) | 5,716 (0,035834) |
| $Y_{123}$      | 16,56 (0)   | 2,100 (0,0169) | 0,035 (0,000021)  | 4,750 (0,03)     |

CO  
0,756 (0,00246)  
0,038 (0,00056)  
0,228 (0,00174)  
0,105 (0,00194)  
0,215 (0,00310)  
0,189 (0,0023)  
0,212 (0,0030)

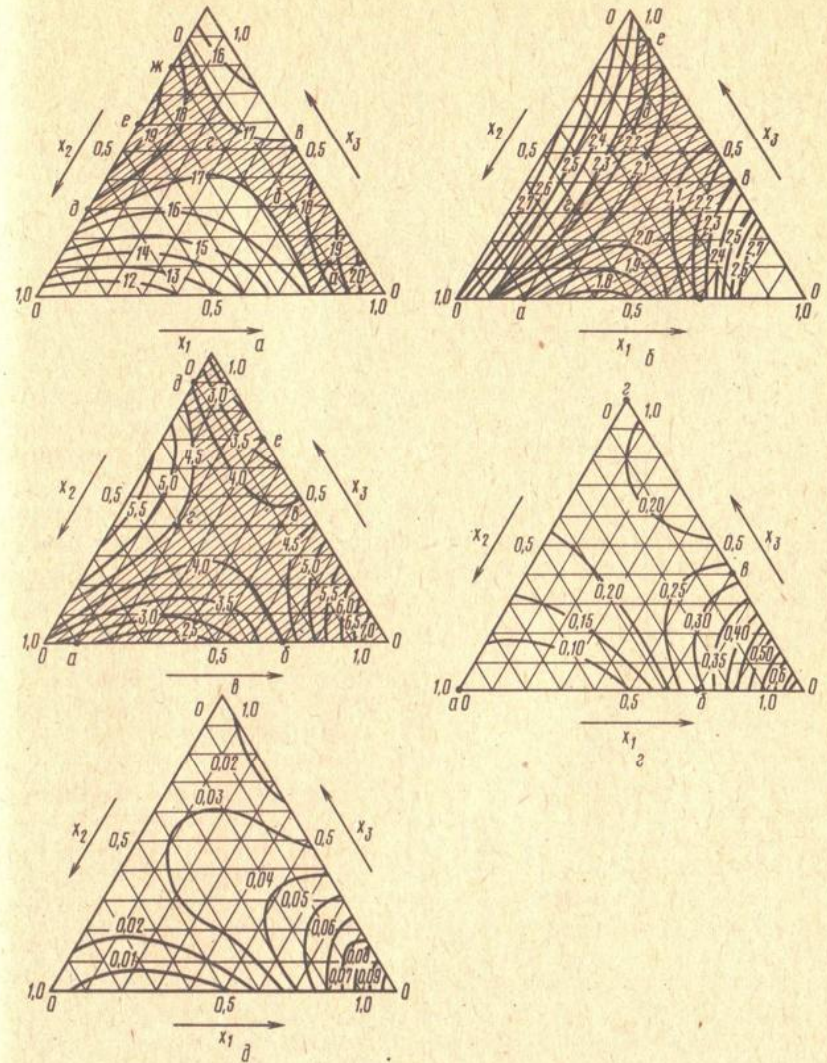


Рис. 64. Диаграмма состав – свойство при подаче метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 (изолиний свойств в барицентрических координатах):  
а – для эффективной мощности; б – оксидов азота; в – сажи; г – окиси углерода; д – углеводородов

## 28. Результаты статистического

| Параметры | $G_{расч}$ | $G_{табл}$ | $S_y^2$  | $\bar{y}_{эксп}$ |
|-----------|------------|------------|----------|------------------|
| $N_e$     | 0,250      | 0,5612     | 0,0226   | 16,56            |
| $NO_x$    | 0,3151     | 0,5612     | 0,0216   | 2,100            |
| $CH_x$    | 0,4256     | 0,5612     | 0,000054 | 0,035            |
| $C$       | 0,399574   | 0,5612     | 0,056309 | 4,750            |
| $CO$      | 0,2053     | 0,5612     | 0,00216  | 0,212            |

в точке *в*: ДТ – 0,5; М – 0,5; В – 0;  
 в точке *г*: ДТ – 0,3; М – 0,5; В – 0,2;  
 в точке *д*: ДТ – 0; М – 0,3; В – 0,7;  
 в точке *е*: ДТ – 0; М – 0,6; В – 0,4;  
 в точке *ж*: ДТ – 0; М – 0,8; В – 0,2.

Это показывает, что подача метанола и воды на впуске позволяет поддерживать мощность дизеля в определенном интервале даже при значительном снижении расхода ДТ (до нуля в кодовых переменных) и замещении его метанолом.

Совместное взаимодействие метанола и воды на впуске и ДТ на содержание  $NO_x$  в ОГ дизеля представлено на рисунке 64, б. Изменение подаваемых смесей влияет на содержание  $NO_x$  от 1,8 до 2,7 мг/л. Площадь диаграммы, соответствующая концентрации  $NO_x$  до 2,3 мг/л, охватывает крайне различные составы смесей (заштрихованный участок на рисунке 64, б). Состав смесей:

в точке *а*: ДТ – 0,2; М – 0; В – 0,8;  
 в точке *б*: ДТ – 0,7; М – 0; В – 0,3;  
 в точке *в*: ДТ – 0,6; М – 0,4; В – 0;  
 в точке *г*: ДТ – 0,2; М – 0,3; В – 0,5;  
 в точке *д*: ДТ – 0,2; М – 0,7; В – 0,1;  
 в точке *е*: ДТ – 0,1; М – 0,9; В – 0.

Полученные данные говорят о том, что при одинаковом уровне содержания  $NO_x$  в ОГ дизельное топливо можно замещать метанолом и водой в значительных количествах и снижать подачу ДТ до 0,1 (в кодовых переменных).

При совместном взаимодействии метанола и воды на впуске и ДТ на содержание сажи в ОГ концентрации сажи изменяется в пределах от 2,5 до 7 ед. по шкале Боша. Площадь диаграммы, соответствующая концентрации сажи до 4,5 ед. по шкале Боша, охватывает различные составы смесей (заштрихованный участок на рисунке 64, в). Состав смесей:

в точке *а*: ДТ – 0,1; М – 0; В – 0,9;  
 в точке *б*: ДТ – 0,7; М – 0; В – 0,3;  
 в точке *в*: ДТ – 0,6; М – 0,4; В – 0;  
 в точке *г*: ДТ – 0; М – 1; В – 0.

При совместном взаимодействии метанола и воды на впуске и ДТ

## анализа уравнений регрессии

| $\hat{y}_{расч}$ | $\Delta y$ | $\xi$ | $t_{расч}$ | $t_{табл}$ |
|------------------|------------|-------|------------|------------|
| 16,4433          | 0,120      | 0,51  | 1,125      | 2,3646     |
| 2,2874           | 0,19       | 0,51  | 1,822      | 2,3646     |
| 0,04667          | 0,01167    | 0,51  | 2,2547     | 2,3646     |
| 4,81             | 0,06       | 0,51  | 0,357      | 2,3646     |
| 0,3270           | 0,1150     | 0,51  | 3,485      | 3,5        |

на содержание в ОГ углеводородов концентрация  $CH_x$  изменяется от 0,01 до 0,1 мг/л (рис. 64, д), причем концентрация  $CH_x$  изменяется незначительно на всей площади диаграммы и возрастает более 0,05 мг/л только в правом углу при увеличении подачи ДТ свыше 0,7, метанола – менее 0,3 и воды – менее 0,2. По окиси углерода и углеводородам возможна работа дизеля с замещением дизельного топлива метанолом и снижением его подачи до нуля (в кодовых переменных).

Для определения составов смесей метанола, воды и ДТ, подаваемых в цилиндры дизеля, и их граничных значений, обуславливающих получение наилучших показателей по всем исследуемым параметрам работы дизеля, необходимо на один симплекс нанести изолинии равного выхода, ограничивающие оптимальные участки по всем полученным диаграммам состав – свойство. От степени требований к ограничениям, предъявляемым к оптимальным участкам диаграмм по соображениям получения лучших мощностных и токсических показателей, в значительной степени зависит выбор и пределы изменения составов смесей метанола, воды и ДТ и соответственно количество замещаемого метанолом ДТ.

На рисунке 65 на симплекс нанесены граничные изолинии мощностных и токсических показателей работы дизеля. По мощности нанесена область значений более 17 кВт; по  $NO_x$  – изолинии, соответствующие концентрации 2,3 и 2,5 мг/л; по саже – 4,5 и 5,5 ед. по шкале Боша; по  $CO$  – 0,35 и 0,4%; по  $CH_x$  – 0,04 и 0,05 мг/л. Анализ совместно нанесенных на симплекс изолиний показывает, что при мощности выше 17 кВт на размеры этой области в первую очередь влияют  $NO_x$ . Увеличение допустимой концентрации  $NO_x$  всего на 0,2 мг/л значительно увеличивает область получения мощности выше 17 кВт. Второй по степени жесткости наложения ограничений на получение больших мощностей, а следовательно, и составу смесей следует сажа. Область мощностей выше 17 кВт резко увеличивается при возрастании допустимой дымности ОГ с 4,5 до 5,5 ед. по шкале Боша.

Меньшие ограничения на мощность дизеля накладывают требования по  $CO$  и  $CH_x$  в ОГ. В отличие от  $NO_x$  и сажи изолинии для окиси углерода 0,3 и 0,4%, а для углеводородов 0,04 и 0,05 мг/л появляются только в правом углу симплекса, в то время как  $NO_x$  и сажа ограничивают мощность в левой половине симплекса.

На рисунке 65 (заштрихованный участок) изолиниями ограничена область мощности выше 17 кВт по  $\text{NO}_x$ , соответствующим 2,3 мг/л. Эта область имеет следующие ограничения по составам смесей метанола, воды и ДТ:  $0,2 < \text{ДТ} < 0,6$ ;  $0,2 < \text{М} < 0,7$ ;  $0,1 < \text{В} < 0,4$ . При рассмотрении ограничений по  $\text{NO}_x$  в 2,5 мг/л составы смесей для получения мощности более 17 кВт будут иметь следующие ограничения (участок с двойной штриховкой):  $0,1 < \text{ДТ} < 0,7$ ;  $0,1 < \text{М} < 0,9$ ;  $0,1 < \text{В} < 0,6$ .

При этом необходимо отметить, что при работе дизеля на смесях в области, ограниченной  $0 < \text{ДТ} < 0,5$ ;  $0,4 < \text{М} < 1$ ;  $0,3 < \text{В} < 1$ , ограничения по  $\text{CH}_x$  и  $\text{CO}$  не накладываются из-за малых значений в отличие от области в правом углу симплекса. Вместе с тем получаемая мощность в обеих областях имеет одинаковый диапазон — 17...19 кВт.

Так, точки *б* и *в* принадлежат изолинии 18 кВт, однако в точке *б* ОГ имеют значительно меньшее содержание токсичных компонентов, чем в точке *в*. При этом точке *б* соответствуют расходы: ДТ — 0,12; М — 0,6; В — 0,28; в точке *в*: ДТ — 0,7; М — 0,2; В — 0,1.

Таким образом, при различных составах смеси метанола, воды и ДТ возможно получение одинаковой мощности при меньшей токсичности ОГ. При этом количество метанола, подаваемого на впуске, увеличивается с 0,2 до 0,6, замещая соответствующее количество ДТ.

Для перехода от кодовых переменных к натуральным используют систему уравнений (54). Например, точка *а* (см. рис. 65) с координатами ДТ — 0,3; М — 0,4; В — 0,3 соответствует мощности дизеля 16,9 кВт.

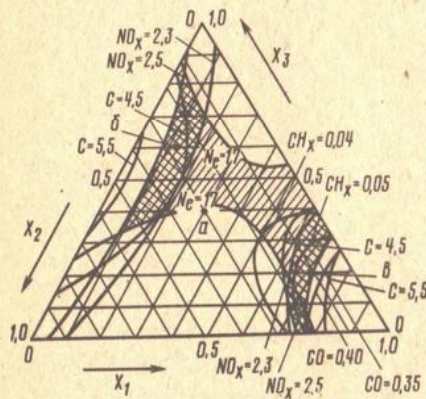


Рис. 65. Ограничения, накладываемые по токсическим показателям на состав смеси (в барицентрических координатах) при оптимизации подачи метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1

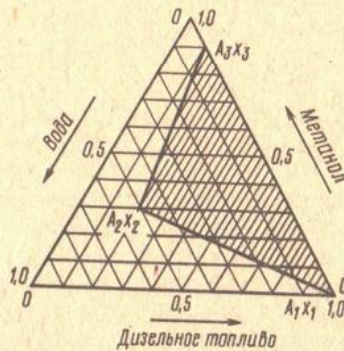


Рис. 66. Расположение триангулированных компонентов и область экспериментирования (заштрихованный участок) при работе дизеля Д-21А1 на метаноле с воспламенением от запального ДТ и при подаче воды во впускной трубопровод (по данным В. М. Попова)

Для получения такой мощности необходимо составить смесь со следующим содержанием ДТ, воды и метанола:

$$\begin{aligned} \text{ДТ} &= 1,0 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,4 = 0,65; \\ \text{В} &= 0,5 \cdot 0,3 + 0,2 \cdot 0,4 = 0,23; \\ \text{М} &= 0,3 \cdot 0,4 = 0,12; \\ \text{ДТ} + \text{В} + \text{М} &= 0,65 + 0,23 + 0,12 = 1,0. \end{aligned}$$

Симплекс-решетчатое планирование эксперимента при изучении диаграмм состав — свойство применялось при исследовании совместного взаимодействия подачи метанола с помощью двойной системы топливоподачи, воды во впускной трубопровод и ДТ с помощью топливной аппаратуры. В этом случае существенно расширяется область экспериментирования, которая представлена на рисунке 66. По технически приемлемым соотношениям компонентов границы локального участка диаграммы лежат в следующей зоне:  $10\% < \text{ДТ} < 100\%$ ;  $0 < \text{М} < 90\%$ ;  $0 < \text{В} < 50\%$ . Состав триангулированных компонентов для исследования локальных участков диаграмм состав — свойство для дизеля Д-21А1 при работе на метаноле с воспламенением от запальной порции топлива и подачей воды на впуске представлен в таблице 29.

29. Состав триангулированных компонентов при работе дизеля на метаноле с подачей воды на впуске

| Фактор | Состав смеси, %        |             |          |
|--------|------------------------|-------------|----------|
|        | дизельное топливо (ДТ) | метанол (М) | вода (В) |
| $x_1$  | 100                    | 0           | 0        |
| $x_2$  | 20                     | 50          | 30       |
| $x_3$  | 10                     | 0           | 90       |

Система уравнений для перехода от натуральных переменных к кодовым и обратно имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{Д} &= 100x_1 + 20x_2 + 10x_3; \\ \text{В} &= 50x_2; \\ \text{М} &= 30x_2 + 90x_3. \end{aligned} \quad (60)$$

Матрица плана Шеффе и условия опыта для модели неполной третьей степени при изучении влияния подачи воды на впуске дизеля Д-21А1, работающего на метаноле с воспламенением от запальной порции ДТ, представлены в таблице 30.

В результате эксперимента (табл. 31) для дизеля Д-21А1 при подаче метанола в КС и воды на впуске получены следующие уравнения неполного третьего порядка:

$$\begin{aligned} N_e &= 21,37x_1 + 0,48x_2 + 22,65x_3 + 17,18x_1x_2 - 15,56x_1x_3 + \\ &+ 28,22x_2x_3 - 21,48x_1x_2x_3 \quad (\text{кВт}); \end{aligned} \quad (61)$$

$$\text{NO}_x = 3,027 x_1 + 0,180 x_2 + 0,927 x_3 - 5,694 x_1 x_2 - 3,948 x_1 x_3 + 0,906 x_2 x_3 + 12,033 x_1 x_2 x_3 \text{ (мг/л);} \quad (62)$$

$$\text{CH}_x = 0,155 x_1 + 0,038 x_2 + 0,150 x_3 + 0,630 x_1 x_3 + 0,738 x_1 x_3 + 0,104 x_2 x_3 - 0,078 x_1 x_2 x_3 \text{ (мг/л);} \quad (63)$$

$$\text{C} = 7,966 x_1 + 1,330 x_2 + 3,900 x_3 + 0,608 x_1 x_2 - 3,052 x_1 x_3 + 0,660 x_2 x_3 + 28,878 x_1 x_2 x_3 \text{ (ед. по шкале Боша);} \quad (64)$$

$$\text{CO} = 0,756 x_1 + 0,107 x_2 + 0,37 x_3 - 0,018 x_1 x_2 - 1,198 x_1 x_3 - 0,300 x_2 x_3 + 0,939 x_1 x_2 x_3 \text{ (%).} \quad (65)$$

30. Матрица плана Шеффе и условия опытов при работе дизеля на метаноле с подачей воды на впуске

| Номер опыта | Индекс отклика | Матрица планирования |       |       | Состав смеси, % |      |    |
|-------------|----------------|----------------------|-------|-------|-----------------|------|----|
|             |                | $x_1$                | $x_2$ | $x_3$ | Д               | В    | М  |
| 1           | $y_1$          | 1                    | 0     | 0     | 100             | 0    | 0  |
| 2           | $y_2$          | 0                    | 1     | 0     | 20              | 50   | 30 |
| 3           | $y_3$          | 0                    | 0     | 1     | 10              | 0    | 90 |
| 4           | $y_{12}$       | 0,5                  | 0,5   | 0     | 60              | 25   | 15 |
| 5           | $y_{13}$       | 0,5                  | 0     | 0,5   | 55              | 0    | 45 |
| 6           | $y_{23}$       | 0                    | 0,5   | 0,5   | 15              | 25   | 60 |
| 7           | $y_{123}$      | 1/3                  | 1/3   | 1/3   | 43,3            | 16,7 | 40 |

В таблице 32 представлены результаты статистического анализа и проверки адекватности полученных уравнений. Установлено, что процесс воспроизводим, а полученные уравнения неполного третьего порядка адекватны. Зависимости свойств трехкомпонентных смесей от их состава показаны изолиниями в барицентрических координатах — треугольными диаграммами состав — свойство на рисунке 67. Из анализа полученных диаграмм видно, что соотношение компонентов оказывает значительное влияние на свойства смесей. Так, при изменении подачи в цилиндры дизеля метанола, ДТ и воды на впуске в кодовых переменных от 0 до 1,0 мощность (рис. 67, а) изменяется от 6 до 22 кВт. При этом состав смеси для получения одного и того же значения мощности может быть весьма разнообразным. Например, значение мощности 18 кВт может быть получено на составах смеси, соответствующих точкам а, б, в и г. Таким образом, при замещении ДТ метанолом и водой можно сохранить это значение мощности, уменьшив расход ДТ до 0 (в кодовых переменных).

Анализ другой диаграммы — для  $\text{NO}_x$  (рис. 67, б) показывает, что увеличение подачи метанола и воды в смеси способствует снижению содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля. Состав смеси, соответствующей выбросам  $\text{NO}_x$  в интервале от 0,75 до 1,0 мг/л (заштрихованный участок), также отличается соотношением компонентов и составляет:

в точке а: ДТ — 0,7; М — 0,0; В — 0,3;

в точке б: ДТ — 0,4; М — 0,3; В — 0,3;

31. Результаты опытов и значение дисперсий в точках при оптимизации подачи метанола непосредственно в камеру сгорания и воды на впуске

| Индекс отклика | Параметры оптимизации (в скобках даны значения $S_y^2$ ) |                |                  |               | C                | CO |
|----------------|--|----------------|------------------|---------------|------------------|----|
|                | $N_e$  | $\text{NO}_x$  | $\text{CH}_x$    |               |                  |    |
| $y_1$          | 21,37 (0,1533)   | 3,027 (0,0424) | 0,155 (0,000163) | 7,96 (0,0633) | 0,756 (0,002460) |    |
| $y_2$          | 0,48 (0,0108)  | 0,180 (0,0021) | 0,038 (0,000087) | 1,33 (0,0652) | 0,107 (0,000122) |    |
| $y_3$          | 22,65 (0,1495)   | 0,927 (0,0046) | 0,150 (0,000326) | 3,90 (0,0075) | 0,387 (0,000598) |    |
| $y_{12}$       | 15,22 (0,1236)   | 0,180 (0,0021) | 0,229 (0,000275) | 4,80 (0,0400) | 0,427 (0,000234) |    |
| $y_{13}$       | 18,12 (0,1164)   | 0,990 (0,0300) | 0,301 (0,000343) | 5,17 (0,0809) | 0,272 (0,001659) |    |
| $y_{23}$       | 18,62 (0,2496)   | 0,780 (0,0171) | 0,122 (0,000095) | 2,78 (0,0258) | 0,172 (0,000605) |    |
| $y_{123}$      | 17,46 (0,1177)   | 0,853 (0,0036) | 0,277 (0,000157) | 5,27 (0,0409) | 0,283 (0,000138) |    |

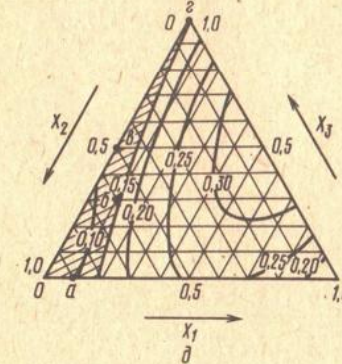
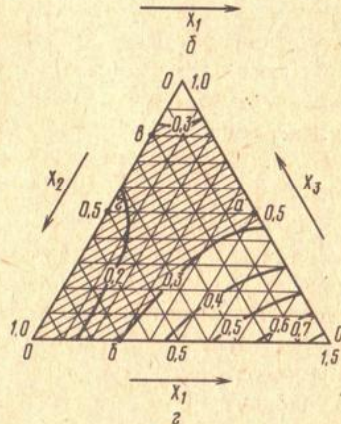
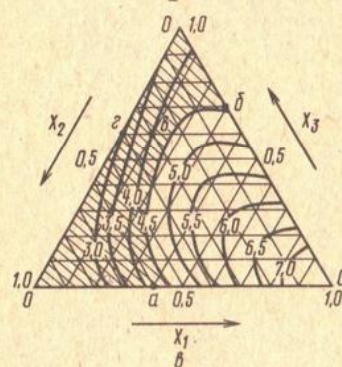
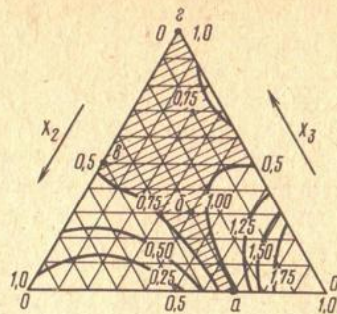
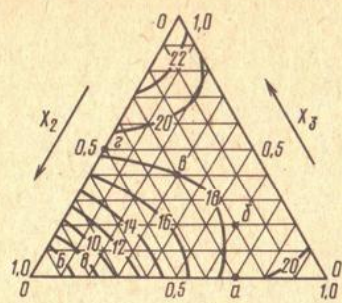


Рис. 67. Диаграммы состав – свойство (изолинии свойств в барицентрических координатах) при оптимизации работы дизеля Д-21А1 на метаноле с воспламенением от запального ДТ и при подаче воды во впускной трубопровод:

*a* – для эффективной мощности;  
*б* – оксидов азота; *в* – сажи;  
*г* – окиси углерода; *д* – углеводородов

в точке *в*: ДТ – 0,0; М – 0,5; В – 0,5;

в точке *г*: ДТ – 0,0; М – 1,0; В – 0,0.

При совместном взаимодействии метанола и ДТ, подаваемых в камеру сгорания, и воды, подаваемой на впуске, содержание сажи изменяется в весьма широких пределах от 3,0 до 7,0 ед. по шкале Боша

(рис. 67, *в*). Также в широких пределах изменяется и состав смеси. Заштрихованному участку на рисунке с содержанием сажи менее 4,5 ед. по шкале Боша соответствуют точки *a*, *б*, *в* и *г* с различными соотношениями компонентов. Из анализа диаграммы следует, что можно снизить подачу ДТ до 0 (в кодовых переменных), замещая его метанолом и водой и значительно снижая при этом содержание сажи в ОГ дизеля. Такое же влияние оказывает изменение состава смеси на содержание СО в ОГ: с увеличением в смеси метанола и воды содержание СО в ОГ дизеля уменьшается (рис. 67, *г*). При этом если посмотреть на концентрации компонентов в точках *a*, *б*, *в* и *г* на заштрихованном участке, соответствующем содержанию СО в ОГ менее 0,3%, то значения их будут отличаться одно от другого в значительной степени.

На содержание  $CH_x$  в ОГ изменение состава смеси оказывает наиболее сложное влияние (рис. 67, *д*). Так, увеличение в трехкомпонентной смеси метанола от 0 до 0,5 (в кодовых переменных) способствует увеличению содержания  $CH_x$  в ОГ, а дальнейшее увеличение – снижению  $CH_x$  в ОГ. Заштрихованному участку на рисунке с содержанием  $CH_x$  менее 0,15 мг/л и его точкам *a*, *б*, *в* и *г* также соответствуют различные составы смеси.

Полученные данные говорят о том, что по СО и  $CH_x$  возможна работа дизеля при снижении подачи ДТ до 0 (в кодовых переменных) за счет замещения его метанолом и водой.

На рисунке 68 на симплекс нанесены граничные изолинии показателей мощности и токсичности дизеля. По мощности нанесена область значений более 18 кВт (участок вверх и вправо от изолинии); по  $NO_x$  – область с содержанием в ОГ менее 1,0 мг/л (участок слева от соответствующей изолинии); по сажи – область с содержанием менее 4,5 ед. по шкале Боша (участок слева от изолинии); по СО – область с содержанием 0,3% (участок слева и вверх от изолинии) и по  $CH_x$  – менее 0,150 мг/л (участок слева от изолинии).

Анализ совместно нанесенных на симплекс изолиний по различным показателям наглядно показывает, что наименьшее влияние на размеры области со значением мощности выше 18 кВт оказывают  $NO_x$  и СО. На уменьшение области мощности выше 18 кВт влияет в первую очередь сажа. При работе дизеля на высоких нагрузках область с содержанием сажи в ОГ менее 4,5 ед. по шкале Боша выражается небольшим участком в левом верхнем углу диаграммы, ограниченном точками *a*, *б*, *в* и *г*. При этом преобладающими компонентами в смеси должны быть метанол и вода, а подача ДТ не должна превышать 0,16...0,17 (в кодовых переменных) от общего состава смеси, причем уменьшение в смеси количества воды и соответственно увеличение метанола способствуют росту мощности дизеля до 20...22 кВт и дальнейшему снижению дымности до 4,0 и менее ед. по шкале Боша.

Большие ограничения на мощность дизеля накладывают требования

| Параметры | $G_p$  | $G_T$  | $S^2_y$  | $\bar{Y}_{\text{экс}}$ |
|-----------|--------|--------|----------|------------------------|
| $N_e$     | 0,2710 | 0,5612 | 0,1316   | 17,46                  |
| $NO_x$    | 0,4161 | 0,5612 | 0,01456  | 0,853                  |
| $CH_x$    | 0,2372 | 0,5612 | 0,000207 | 0,277                  |
| C         | 0,2499 | 0,5612 | 0,04624  | 5,27                   |
| CO        | 0,4230 | 0,5612 | 0,000831 | 0,283                  |

по  $CH_x$  в ОГ. Из диаграммы видно, что участком с мощностью выше 18 кВт и содержанием углеводородов в ОГ менее 0,150 мг/л остается маленький треугольник  $abd$  (участок с двойной штриховкой). Наименьшее содержание  $CH_x$  будет в точке  $a$  с составом смеси: ДТ — 0,0; М — 0,48; В — 0,52. При работе на составе смеси, соответствующем точке  $b$  (ДТ — 0,0; М — 1,0; В — 0,0), дизель развивает максимальную мощность, не увеличивая выбросов  $CH_x$  с ОГ.

Таким образом, при подаче метанола в КС (воспламенение его запальным ДТ) и воды на впуске получение высоких мощностных и наилучших токсических показателей возможно при максимальном сокращении расхода ДТ (до 0 в кодовых переменных) за счет замещения его метанолом и водой. При этом, изменяя соотношение в смеси метанола и воды, можно добиваться либо возрастания мощности (с увеличением количества метанола), либо еще некоторого снижения токсичности (с увеличением количества воды) при незначительном уменьшении мощности. Для перехода от кодовых переменных к натуральным в данном случае необходимо использовать систему уравнений (60).

В исследованной области факторного пространства можно, изменяя количество и соотношения подаваемых в цилиндры дизеля метанола, воды и ДТ, прогнозировать содержание токсичных компонентов в ОГ, мощностные показатели дизеля, а также планировать замещение дизельного топлива метанолом, не ухудшая показателей работы двигателя.

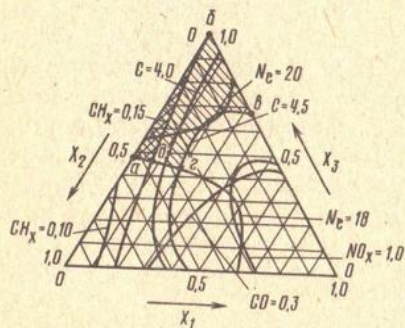


Рис. 68. Ограничения, накладываемые по мощностным и токсическим показателям на составы смесей при оптимизации работы дизеля Д-21А1 на метаноле с воспламенением от запального ДТ и при подаче воды во впускной трубопровод

| $\hat{Y}_{\text{расч}}$ | $\Delta y$ | $\xi$ | $t_{\text{расч}}$ | $t_{\text{табл}}$ |
|-------------------------|------------|-------|-------------------|-------------------|
| 18,29                   | 0,83       | 0,51  | 3,22              | 3,50              |
| 1,025                   | 0,172      | 0,51  | 2,0086            | 2,3646            |
| 0,302                   | 0,024      | 0,51  | 2,3524            | 2,3646            |
| 5,62                    | 0,35       | 0,51  | 2,3326            | 2,3646            |
| 0,298                   | 0,015      | 0,51  | 0,7341            | 2,3646            |

На основании проведенных исследований по применению планирования эксперимента для оценки токсичности ОГ дизеля при подаче метанола на впуске можно сделать следующие выводы:

1) планирование эксперимента с помощью симплекс-решетчатых планов Шеффе по изучению локальных участков диаграмм состав — свойство позволяет значительно расширить область применения теории планирования эксперимента и качественно решить задачу определения совместного влияния подачи метанола, воды и ДТ на мощность и содержание в ОГ дизеля основных токсичных компонентов для выбора наиболее приемлемых составов смесей;

2) с помощью полученных диаграмм состав — свойство исследованной локальной области симплекса можно прогнозировать содержание токсичных компонентов в ОГ и мощность дизеля в зависимости от состава смеси, а также планировать замещение дизельного топлива метанолом без ухудшения мощностных и токсичных показателей.

## 10. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Применение в ДВС новых видов топлива неаэриального происхождения позволяет в ряде случаев решить не только энергетическую проблему, но и целый ряд экологических вопросов, связанных со снижением токсичности ОГ. Для дизелей в качестве перспективных рассматриваются газообразные топлива, и в первую очередь природный газ, сжиженные газы и спиртовые топлива (метанол, этанол). На более далекую перспективу рассматриваются в качестве топлива кислород, биогаз и каменноугольная пыль. Необходимо сразу оговориться, что применение новых, нетрадиционных видов топлива на автотракторных дизелях связано, как правило, с решением целого ряда вопросов по организации рабочего процесса, регулирования и дозирования, хранения и заправок, а также получения их в достаточном количестве при невысокой себестоимости и целого ряда других, не менее важных вопросов, решать которые необходимо во взаимосвязи. Ниже более подробно остановимся на двух основных видах топлива — сжатом природном

газе и метаноле, которые уже сейчас можно применять в автотракторных дизелях при незначительных переделках конструкции базовых двигателей и использовании существующего отечественного газового оборудования, позволяющих одновременно достаточно эффективно снижать токсичность ОГ.

**Применение природного газа.** Способ воспламенения газового топлива дозой запального жидкого топлива был запатентован Р. Дизелем еще в 1898 г. Практически газовое топливо в транспортных двигателях начали применять в 30-х годах нашего столетия, но тогда на первое место выдвигалась задача перевода дизелей на генераторный газ. В СССР переводом дизелей на генераторный газ занимались в разное время в период с 1931 по 1946 г. институты НАМИ, НАТИ, ЦНИДИ, ЦНИИ МПС, МВТУ им. Баумана и различные предприятия. Именно в то время были заложены основные направления фундаментальных научных исследований в этой области и получены серьезные результаты. В середине 60-х годов были созданы газодизельные двигатели М-601, В2-300ГД, В2-450ГД и их модификации. Однако перевод на природный газ дизелей малой размерности не получил распространения. Практически не изучены вопросы снижения токсичности ОГ дизелей при работе на природном газе.

В последнее время интерес к использованию природного газа в дизелях возрос с точки зрения экономии нефтяного топлива. Вместе с тем применение газа существенно снижает в ОГ содержание сажи. Институтом НАМИ разработан, а завод осуществляет выпуск первых партий автомобилей КамАЗ с газобаллонным оборудованием, работающих по газодизельному процессу на сжатом природном газе, планируется выпуск газобаллонных автомобилей заводами МАЗ, КраЗ, а также Ликинским и Львовским автобусными заводами. По заказу Минавтосельмаша СССР в Кировском сельскохозяйственном институте создана модификация трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. Также планируется создание модификации газобаллонных тракторов МТЗ-80, МТЗ-100 и Т-150К на природном газе.

**Методы подачи газа.** В дизелях сжатый природный газ (СПГ) подают следующим образом. Газ смешивается с воздухом в смесителе-дозаторе, установленном на впускном трубопроводе, и поступает в цилиндр. Жидкое топливо подается через штатную топливную систему в конце такта сжатия.

На базе такого дизеля возможно создание газового двигателя, в котором в цилиндры подается газ, а воспламенение происходит с помощью искровой свечи зажигания. Преимущество газового двигателя заключается в возможности работы полностью на газе, исключая жидкое топливо, а к недостаткам — необходимость серьезных конструктивных изменений, требующих переделки дизеля.

Для перевода работы дизеля на СПГ с воспламенением от запальной

порции ДТ (газодизельный или газожидкостный процесс) не требуются значительные переделки и перерегулировки двигателя. При таком способе необходимо установить смеситель на впускном трубопроводе, разработать систему регулирования подачи газа, соединить ее с газовыми заслонками. Степень сжатия дизеля, как правило, остается неизменной. Экспериментально подбираются оптимальные регулировки установочного угла опережения впрыскивания топлива и подачи запальной порции ДТ, которая может оставаться постоянной или меняться в зависимости от частоты вращения и нагрузки. Изменения в регуляторе относятся в основном к конструкции привода дроссельных заслонок, установке ограничителей подачи запального ДТ и переключателей вида топлива. В таком положении газожидкостный дизель одинаково пригоден для работы как на СПГ с запальной порцией ДТ, так и по чисто дизельному процессу, что является одним из существенных преимуществ модернизации. Вместе с тем этот способ замещает на номинальном режиме лишь до 80% ДТ и требует установки двух систем питания: для ДТ и СПГ.

Для обеспечения среднесуточного пробега автомобиля или трактора системы питания СПГ тяжеловесны, так как в их состав входят баллоны из легированной или углеродистой стали. Давление СПГ в таких баллонах создается по 20...32 МПа, емкость каждого из баллонов 40...50 л, масса 70...90 кг.

Сопоставляя способы перевода дизелей на СПГ, следует отметить, что применительно к четырехтактным автотракторным дизелям наиболее простым и экономичным, позволяющим применять СПГ не только на вновь проектируемых, но и на уже находящихся в эксплуатации, является способ работы дизеля по газодизельному процессу и подаче газа на такте впуска во впускной трубопровод с воспламенением газозоо-душнoй смеси от запальной порции ДТ, направляемой штатной топливной аппаратурой в конце такта сжатия. Именно этот способ и получил свое развитие в автотракторных дизелях.

Влияние подачи природного газа на рабочий процесс и токсичность отработавших газов. Отличительная черта газожидкостного процесса — относительная простота конвертации дизеля на газ, отсутствие переделок самого двигателя. Возможность работы двигателя (в зависимости от наличия топлива) или на газе, или на ДТ является определяющим звеном в перспективе использования газодизелей в автотракторной технике. Это самый простой путь в реальной замене части ДТ на сжатый природный газ. Особенностью газодизельного процесса является то, что в цилиндре дизеля находится газозоо-душная смесь, которая сжимается и нагревается до температуры ниже, чем температура ее самовоспламенения, но выше, чем температура самовоспламенения ДТ.

В сжатую и нагретую до указанных пределов газозоо-душную смесь с помощью штатной топливной аппаратуры подается небольшое количество запального ДТ, которое и самовоспламеняется. Самовоспламеняю-



щиеся капли ДТ создают первоначальные очаги воспламенения газовой смеси не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда и в нескольких местах одновременно. Таким образом, наличие газовой смеси создает свои особенности в организации рабочего процесса. Второй особенностью является то, что мощность и частота вращения газодизеля регулируются количеством газа, поданного в цилиндр, а запальная порция ДТ остается неизменной. Это накладывает особые требования на работу топливной аппаратуры, и в первую очередь на низкую неравномерность подачи топлива по секциям на малых цикловых подачах и одновременно хорошем качестве распыла. На характер протекания газодизельного процесса существенное влияние оказывает минимальная подача ДТ, обеспечивающая стабильную работу двигателя на всех нагрузочных и скоростных режимах. Минимальную дозу дизельного топлива определяют как границу устойчивой работы дизеля, характеризующуюся резким увеличением неидентичности последовательных рабочих циклов и появлением пропусков воспламенения.

В Кировском СХИ были проведены работы по переводу дизеля Д-21А1 (2Ч 10,5/12) трактора Т-25А на сжатый природный газ. В качестве смесителя-дозатора был разработан специальный смеситель, позволяющий с помощью кольцевой щели равномерно подводить газ к диффузору и осуществлять с помощью заслонки регулирование подачи газа в широких пределах. Работа по регуляторной характеристике проводилась с помощью специально разработанной системы регулирования подачи газа в зависимости от нагрузки и скоростного режима. Заслонка смесителя и регулятор связаны между собой дополнительной тягой. Запальная порция ДТ подавалась топливным насосом при фиксированном положении дозатора, который фиксировался с помощью электромагнитного клапана.

Испытания показали, что дизель устойчиво работает на природном газе при соотношении на номинальном режиме: газа — 80%, запального топлива — 20%. Исследования рабочего процесса проводились в дальнейшем именно на таком соотношении. Эксперимент показал, что при работе на газе необходимо уменьшать установочный угол опережения впрыскивания топлива из-за чрезмерного повышения "жесткости" газодизельного процесса. На рисунке 69, а представлены показатели процесса сгорания дизеля Д-21А1 в зависимости от  $\theta$  для частоты вращения 1800 мин<sup>-1</sup>. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу возрастает максимальное давление газов в цилиндре двигателя, одновременно резко возрастает  $(dp/d\varphi)_{max}$  и при  $\theta = 26$  град п.к.в. превышает значения 0,8 МПа/град. Увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения и степень повышения давления.

Таким образом, по показателям процесса сгорания необходимо для газодизельного процесса устанавливать угол  $\theta = 22$  град п.к.в. вместо 26 град при дизельном процессе.

Из характеристик тепловыделения дизеля (см. рис. 69, б) видно,

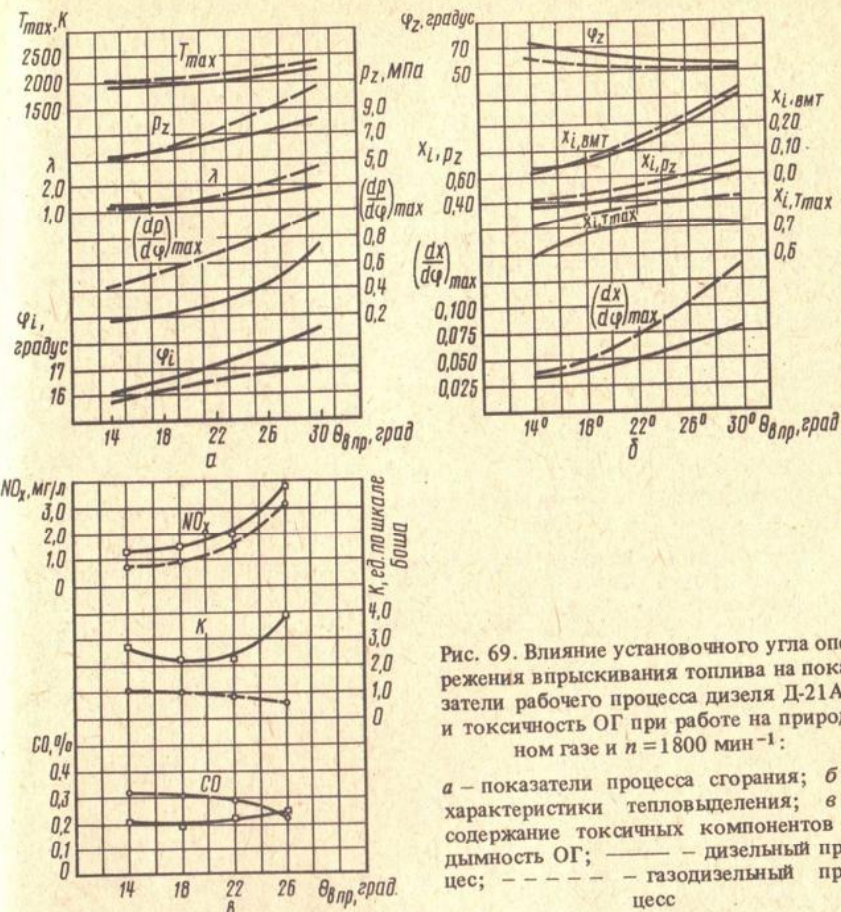


Рис. 69. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива на показатели рабочего процесса дизеля Д-21А1 и токсичность ОГ при работе на природном газе и  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>:

а — показатели процесса сгорания; б — характеристики тепловыделения; в — содержание токсичных компонентов и дымность ОГ; — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

что при работе по газодизельному процессу и увеличении  $\theta$  возрастает максимум скорости активного тепловыделения. Если при  $\theta = 22$  град п.к.в. его значение составляет 0,075 при газодизельном процессе, то при  $\theta = 26$  град п.к.в. значение равно уже 0,1. Наблюдается рост величины полезного выделения теплоты при максимальной усредненной температуре газов в цилиндре. Вместе с тем значение  $\varphi_z$  при увеличении угла снижается и лежит ниже значений дизельного процесса.

Увеличение показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения на всех исследуемых углах  $\theta$  объясняется в первую очередь тем, что при работе на газе уменьшается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, т.е. процесс воспламенения протекает более интенсивно, в меньший период времени, что не может не влиять на остальные фазы процесса горения. Содержание токсичных компонентов в

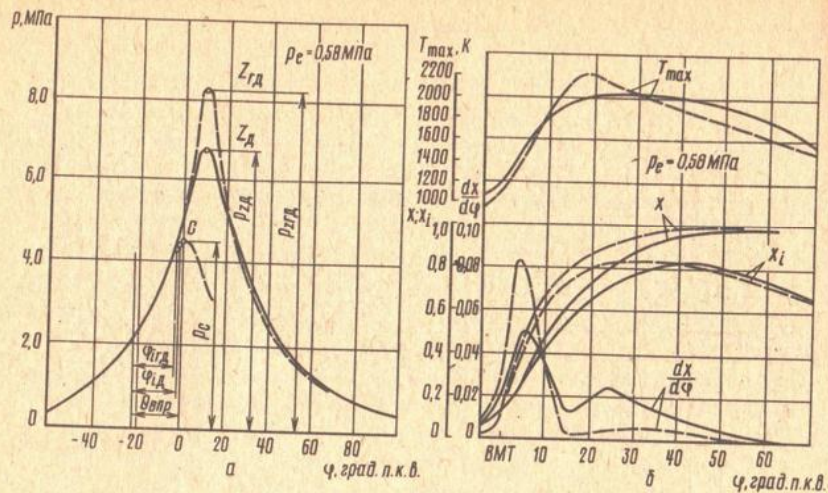


Рис. 70. Влияние подачи газа на индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля Д-21А1 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $\theta = 22 \text{ град п.к.в.}$ :

*a* — индикаторные диаграммы; *б* — графики динамики выделения теплоты  $dx$ , усредненной температуры газов в цилиндре  $T$ ; скорости отвода теплоты  $x$  и полезного выделения теплоты  $x_i$  в функции угла поворота коленчатого вала; — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

ОГ дизеля при работе на газе (рис. 69, в) и изменении  $\theta$  находится в определенной зависимости. Если на содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ влияет в основном вид топлива, то на содержание сажи — и угол  $\theta$ . При увеличении  $\theta$  и работе на газе выход сажи с ОГ не увеличивается.

Индикаторное дизеля Д-21А1 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и оптимальном для газодизельного процесса  $\theta = 22 \text{ град п.к.в.}$  и результаты обработки индикаторных диаграмм (рис. 70, *a* и *б*) показали, что при работе с подачей газа уменьшается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, возрастает давление в цилиндре, увеличивается "жесткость" работы дизеля. На линии расширения кривая давления проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса. Из графиков динамики выделения теплоты, усредненной температуры газов в цилиндре, скорости отвода теплоты и полезного ее выделения (см. рис. 70, *б*) видно, что резко увеличивается скорость активного тепловыделения, изменяется характер протекания кривых скорости отвода теплоты и полезного ее выделения.

Для газодизельного процесса характерно увеличение усредненной температуры газов в цилиндре, смещение максимального значения в сторону ВМТ. Увеличение доли процентного выгорания топлива в начальный период при работе по газодизельному процессу приводит к снижению доли потерь теплоты в начальный период. Это вызывает увеличение

коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование теплоты в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

Анализ показателей процесса сгорания при работе дизеля Д-21А1 на газе в зависимости от нагрузки для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $\theta = 22 \text{ град п.к.в.}$  (рис. 71, *a*) показывает, что значения  $p_z$ ,  $T_{\text{max}}$  и степени повышения давления при газодизельном процессе выше, чем при дизельном во всем диапазоне изменения нагрузки. Значения  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$  газодизельного процесса резко увеличиваются при нагрузке выше 0,4 МПа, а при меньших значениях они лежат ниже кривых дизельного процесса. Характеристики тепловыделения (рис. 71, *б*) показывают, что при работе на газе характер их изменения в зависимости от нагрузки существенно отличается от характеристик дизельного процесса. Так, максимум скорости активного тепловыделения при работе по дизельному процессу снижается с 0,078 до 0,047 при увеличении нагрузки до максимальной, а при работе на газе, наоборот, возрастает с 0,022 до 0,077. Аналогичная картина наблюдается и для значений активного выделения теплоты в ВМТ при максимальном давлении в цилиндре, максимальной усредненной температуре в цилиндре. Значения  $\varphi_z$  лежат при работе на газе выше аналогичной кривой дизельного процесса во всем диапазоне нагрузок.

Анализ мощностных и экономических показателей работы дизеля Д-21А1 при подаче газа в зависимости от нагрузки (рис. 72, *a*) показывает, что величина запальной порции ДТ не изменяется и составляет 0,9 кг/ч, или 20% к расходу по дизельному процессу; 80% ДТ замеща-

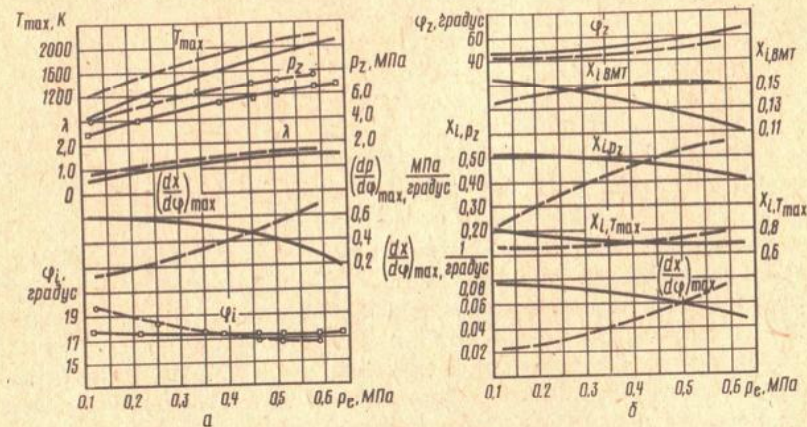


Рис. 71. Влияние подачи газа на показатели рабочего процесса дизеля Д-21А1 в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $\theta = 22 \text{ град п.к.в.}$ :

*a* — показатели процесса сгорания; *б* — характеристики тепловыделения; — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

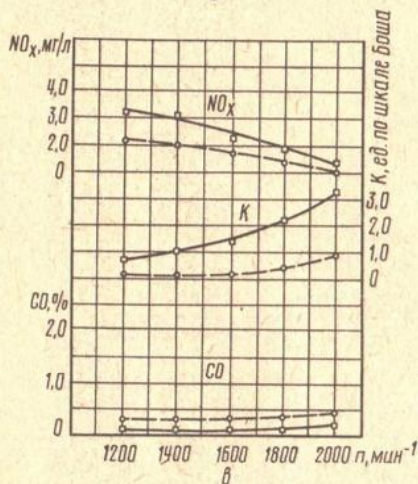
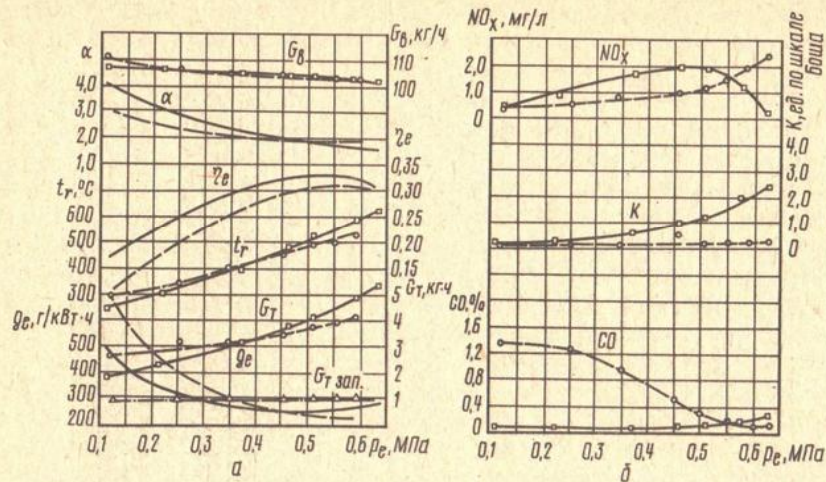


Рис. 72. Влияние подачи газа на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1 при  $\theta = 22$  град:

*a* — мощностные, экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; *б* — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; *в* — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения; — — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс;  $\Delta$  - - -  $\Delta$  — расход запального ДТ

ется природным газом. Эффективный КПД снижается на 0,2...0,3 единицы. На номинальной нагрузке снижается температура ОГ и  $\alpha$ , что свидетельствует об улучшении использования воздуха, поступившего в цилиндр.

Результаты по изменению содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля при работе на газе в зависимости от нагрузки показывают, что содержание  $\text{NO}_x$  (рис. 72, б) снижается при работе по газодизельному процессу на малых нагрузках и выравнивается с дизельным процессом при  $p_e > 0,55 \text{ МПа}$ . Содержание сажи снижается в ОГ при работе на газе существенным образом во всех диапазонах нагрузки, особенно номинальных. Так, если содержание сажи в ОГ при дизельном процессе

составляет на максимальной нагрузке 2,5 ед. по шкале Боша, то при переходе на газодизельный процесс содержание сажи в ОГ не превышает 0,1...0,2 ед. по шкале Боша. Содержание  $\text{CO}$  в ОГ при малых нагрузках достигает при газодизельном процессе 1,3%, но при значении  $p_e = 0,56 \text{ МПа}$  становится равным содержанию  $\text{CO}$  в ОГ дизельного процесса. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при работе на газе в зависимости от частоты вращения снижается для  $\text{NO}_x$  и сажи во всем диапазоне частот вращения (рис. 72, в). Так, содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снижается на 1 мг/л при частоте вращения  $1200 \text{ мин}^{-1}$  и на 0,3 мг/л при  $2000 \text{ мин}^{-1}$ , т.е. эффект снижается при увеличении частоты вращения. Эффективность снижения содержания сажи при повышении частоты вращения увеличивается; если при  $1200 \text{ мин}^{-1}$  содержание сажи снижается в ОГ при работе на газе на 0,6 ед. по шкале Боша, то при  $2000 \text{ мин}^{-1}$  — на 2...3 единицы. Выброс сажи на этой частоте при работе на газе не превышает 0,9 ед. по шкале Боша. Одновременно наблюдается некоторое увеличение содержания  $\text{CO}$  в ОГ. Это увеличение не превышает 0,2...0,25%.

Модернизация трактора Т-25А для работы на сжатом природном газе. В Кировском сельскохозяйственном институте создан опытный образец трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. При разработке трактора использовалась серийно выпускаемая газовая ап-

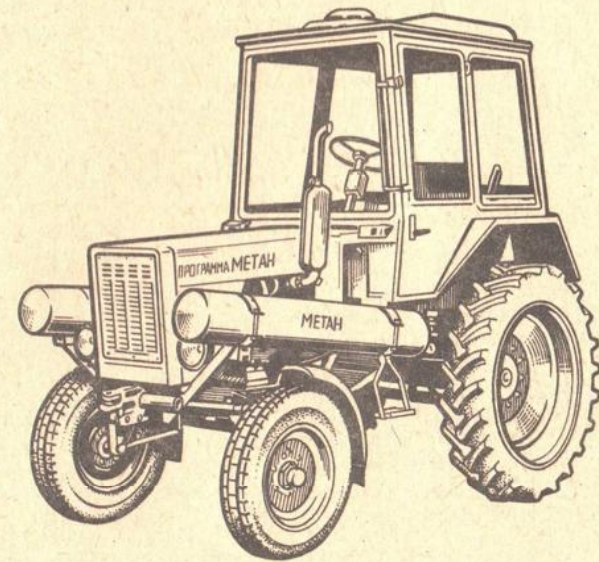


Рис. 73. Общий вид трактора Т-25А, переоборудованного для работы на сжатом природном газе

паратура от газобаллонных автомобилей ЗИЛ-138А и ГАЗ-53-27. Общий вид трактора представлен на рисунке 73.

Два баллона из легированной стали вместимостью 50 л и массой 70 кг каждый заполняют природным газом под давлением 20 МПа. Запаса газа хватает на 7 ч работы. В кабине трактора установлены дополнительно два элемента газовой системы: манометр, показывающий давление в газовом редукторе при включении подачи газа, и тумблер, переключающий вид топлива путем включения соответствующих электромагнитных клапанов. Дозатор топливного насоса фиксируется одним электромагнитным клапаном при установке переключателя в кабине трактора в положение "Газ", одновременно второй клапан открывает подачу газа в газовый редуктор. Тяга, соединяющая регулятор топливного насоса с заслонкой газового смесителя, перемещает ее в зависимости от положения рычага управления подачей топлива в кабине трактора и заданного таким образом скоростного режима, регулируя подачу газа. Таким же образом регулируется и нагрузка двигателя.

На трактор устанавливаются также редуктор, трубопроводы высокого и низкого давления, вентили и другая аппаратура. Функциональные испытания модернизированного трактора в условиях Кировской области показали возможность широкого использования таких тракторов в хозяйствах, расположенных вблизи газонаполнительных станций, животноводческих комплексах, теплицах, складах минеральных удобрений и других сельхозпомещениях с ограниченным воздухообменом, где необходимо выдерживать требования по загрязнению атмосферного воздуха рабочей зоны, а также в коммунальном хозяйстве городов и поселков.

**Газодизели в СССР и за рубежом.** В СССР в послевоенные годы увеличилось число работ, направленных на перевод дизелей для работы по газодизельному процессу. Так, для речных пароходов, оборудованных газогенераторными установками, выпускались газодизели ЗД-6-ГД; для стационарных и передвижных установок выпускался дизель 1ДБ-ГД [42].

Модернизация дизелей В2 закончилась созданием газодизелей В2-300ГД и В2-450ГД. Для тепловозов был создан газодизель на базе дизеля Д-50, для буровых установок — ГД-700 [43, 44].

Работ по переводу дизелей тракторов и автомобилей на СПГ, закончившихся созданием опытных партий газодизелей, прошедших широкие эксплуатационные испытания, в СССР до настоящего времени не проводилось. Вместе с тем планируется перевести на природный газ 213 тыс. автомобилей, из них 82 тыс. с дизелями.

Ведущее положение за рубежом в области применения СПГ в качестве моторного топлива для автотранспорта занимает Италия. Ведутся серьезные работы по использованию природного газа в качестве топлива в ФРГ, Франции, Канаде, США, Нидерландах, Японии и других странах.

В Новой Зеландии осуществляется программа перевода до 500 000 автомобилей на СПГ, что позволит сократить на 30...50% импорт нефти [45]. Создается широкая сеть автомобильных газонаполнительных компрессорных станций.

Канадские специалисты предполагают, что в ближайшие 10 лет в Канаде можно перевести на газ до 500 000 автомобилей.

Во Франции в ближайшее время планируется существенно повысить рост доли природного газа в общем энергетическом балансе страны за счет увеличения испо-

льзования газа на автотранспорте. Планируется расширение сети газонаполнительных станций, разработка модификаций ДВС, приспособленных для работы на газе.

Увеличивается количество фирм, выпускающих двигатели для работы на газе и проводящих исследования в этом направлении. Так, выпуском газодизелей занимаются фирмы "Нордберг", "Форбекке-Морз", "Делаваль-Энтерпрайз", "СЕМТ-Пилотик", "Зульцер" и др. При этом необходимо отметить, что это фирмы, выпускающие судовые газодизели.

Переводом тракторных дизелей на природный газ серьезно занимаются в Италии. Так, фирма "Тессари" занимается переводом дизелей на природный газ по чисто газовому и газодизельному процессам. Этой фирмой также подготовлен дизель мощностью 100 кВт для автобусов во Флоренции с целью понижения загазованности атмосферного воздуха этого центра туризма Италии. Разработкой газовой аппаратуры для газодизелей занимаются итальянские фирмы "Тартарини" и "Ланди Ренцо".

К разработке газодизелей для работы на СПГ присоединилась японская фирма "Тойота". Переоборудованию на природный газ были подвергнуты четырехцилиндровый дизель с вихревой камерой "Рикардо Комет" МК-5 и серийный дизель объемом 1470 см<sup>3</sup> с турбокомпрессором, устанавливаемый на экспериментальный автомобиль "Викинг-4" фирмы "Фольксваген".

В Аризонском университете (США) переведен на природный газ дизель сельскохозяйственного назначения фирмы "Форд". Трехцилиндровый дизель объемом 3300 см<sup>3</sup> степени сжатия 16,5 оборудован газовым смесителем "Импко" с диффузорами различных сечений и специальной муфтой для опережения впрыскивания топлива. Исследователи отмечали, что при переходе на газодизельный процесс мощность двигателя остается на том же уровне, но при этом снижается дымность ОГ.

**Применение метанола.** Возможность использования метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей обуславливается в первую очередь тем, что в условиях дефицита ДТ топлива метанол может быть получен из любого газообразного топлива, а также из пищевых и сельскохозяйственных отходов. Метанол (метиловый спирт — CH<sub>3</sub>OH) можно отнести к возобновляемым источникам энергии, его в значительных количествах синтезируют из CO и H<sub>2</sub> (CO + 2H<sub>2</sub> → CH<sub>3</sub>OH).

Метанол является весьма токсичным соединением, так как в организме человека превращается в формальдегид и муравьиную кислоту. Применению в дизелях метанола в чистом виде препятствует ряд обстоятельств. В первую очередь это отличия от топлив нефтяного происхождения. Цетановое число метанола не превышает 5 вместо 50 у ДТ, т.е. метанол имеет низкую склонность к самовоспламенению. Кроме того, у метанола низкая теплота сгорания — 19 665 вместо 42 530 кДж/кг для ДТ, а теплота испарения 1109 (у ДТ — 251 кДж/кг). Температура воспламенения метанола 470 °С, а ДТ — всего 200...220 °С. Температура вспышки 11 °С, т.е. ниже, чем у ДТ (75 °С). Вместе с тем октановое число метанола около 110...115 единиц по исследовательскому методу, т.е. он обладает высокой детонационной стойкостью, меньшей плотностью — 791 кг/м<sup>3</sup> (при плотности ДТ 830 кг/м<sup>3</sup>), высокой температурой кипения. Теплота сгорания горючей смеси у обоих топлив практически одинакова: 2,76 МДж/кг у метанола и 2,77 МДж/кг у ДТ. Вследствие наличия в молекуле метанола атома кислорода он

характеризуется низким стехиометрическим соотношением: 6,4:1 (для ДТ — 14,5:1). Для достижения такого же по объему энергосодержания заряда топливовоздушной смеси в него должно быть введено метанола примерно в 2,3 раза больше, чем ДТ. Для обеспечения одинакового запаса хода автомобиля или тракторы должны снабжаться топливными баками, во столько же раз большими по объему [46...50].

Эти данные свидетельствуют о том, что дизель на чистом метаноле вследствие низкой склонности к самовоспламенению может работать только после конструкционных изменений. Для улучшения воспламенения метанола в дизеле возможно применение принудительного зажигания, присадок, инициирующих горение и т.д. Все это требует серьезных исследовательских и конструкторских работ.

Подача метанола может быть осуществлена различными способами. Анализ работ, посвященных этому вопросу, позволяет систематизировать способы подачи метанола и представить их в виде схемы (рис. 74). Основные методы подачи метанола в дизель: в жидком виде, в виде топливной эмульсии (смесь метанола и ДТ), в виде пара. Эти методы могут быть реализованы по-разному, имеют существенные отличия и на конкретных моделях дизелей требуют различных конструктивных изменений. Подача метанола во впускной трубопровод не требует применения сложной аппаратуры, позволяет более полно использовать воздух в объеме цилиндра, что повышает тепловую эффективность сгорания горючего заряда.

Метанол можно подавать в виде эмульсии, пара и в жидком виде. Процентные отношения подаваемого метанола и ДТ для каждого спо-

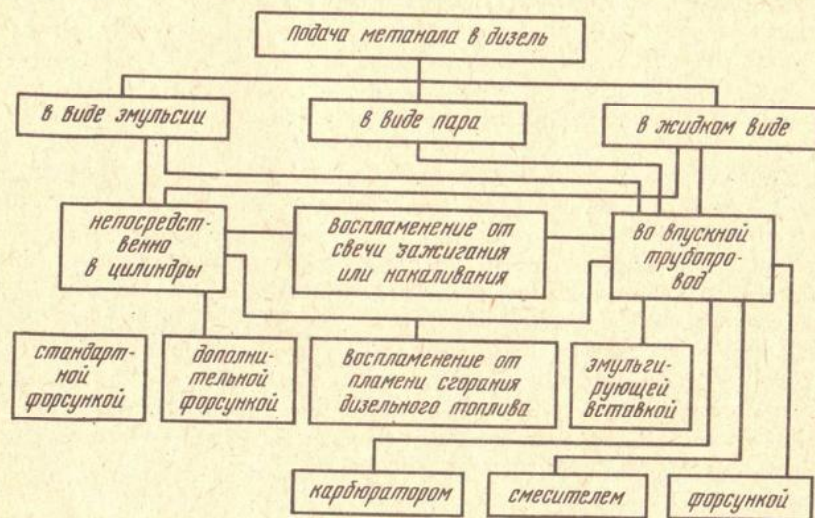


Рис. 74. Структурная схема способов подачи метанола в дизель

соба различны. Метанол можно также подавать непосредственно в цилиндр дизеля в виде эмульсии и жидком виде с помощью насоса и форсунки. Количество подаваемого метанола и степень изменения конструкции дизеля также могут быть различны. На дизель в зависимости от способа подачи и воспламенения метанола можно устанавливать систему зажигания, свечи накаливания или зажигания, дополнительные форсунки, двойной комплект топливной аппаратуры.

Анализ работ, проводимых за рубежом по исследованию возможности применения метанола в качестве топлива для дизелей, позволяет сделать вывод о том, что они ведутся в различных направлениях, начиная от создания новых моделей дизелей, разработанных специально для работы на метаноле, и кончая модернизацией дизелей, выпускающихся серийно и без значительных конструкционных изменений, оборудованных для работы на метаноле.

Подача метанола на впуске с помощью карбуратора. Этот способ является наиболее простым, не требующим серьезных конструктивных изменений и дающим возможность частично заменить ДТ метанолом [51]. Очевидно, что подача метанола на впуске, сжатие метаноловоздушной смеси и впрыскивание ДТ в эту активную среду будут определенным образом влиять на процесс сгорания. Метанол имеет очень высокую по сравнению с ДТ скрытую теплоту испарения — 1100 против 210 кДж/кг, а понижение температуры смеси при ее полном испарении и  $\alpha=1$  составляет  $123^{\circ}\text{C}$ . Такое охлаждение топливного заряда, несомненно, вызовет уменьшение температуры на впуске, в конце такта сжатия и в итоге температуры всего процесса горения. По этой причине количество подаваемого метанола на впуске дизеля в какой-то мере будет ограничено. Расчеты по известным зависимостям показали, что понижение температуры за счет испарения при подаче метанола на впуске в количествах 15, 30, 40 и 50% к расходу основного топлива (дизельного) составило соответственно 5,5; 10,87; 14,38 и  $17,38^{\circ}\text{C}$ . С учетом этого при среднем значении политропы сжатия 1,35 получены следующие теоретические температуры конца сжатия при подаче метанола на впуске дизеля:  $T_{c15}=601,4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c30}=587,5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c40}=578,7^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c50}=569,7^{\circ}\text{C}$ , где цифровой индекс означает количество подаваемого на впуске метанола в процентах к расходу ДТ. Таким образом, даже при подаче 50% метанола на впуске, несмотря на его высокую скрытую теплоту испарения, температура конца сжатия будет вполне достаточной для воспламенения ДТ и метаноловоздушной смеси. Необходимо также учитывать, что при подаче метанола на впуске дизеля к моменту подачи в цилиндры ДТ там будет находиться испаренная и готовая к воспламенению гомогенная топливовоздушная смесь, влияющая на весь процесс сгорания в дизеле.

Обогащение воздушного заряда метанолом способствует организации диффузионно-химического распространения пламени и содействует в объеме КС подготовке химически активной среды, способной порож-

дать новые активные центры. Увеличение скорости распространения пламени при значительном увеличении подачи метанола во впускной трубопровод может вызвать возрастание жесткости работы дизеля. В связи с этим на количество подаваемого метанола во впускной трубопровод дизеля должны накладываться соответствующие ограничения.

Метанол подавался во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 с помощью карбюратора с регулируемым жиклером, что позволяло изменять количество подаваемого метанола в цилиндры дизеля. В связи с тем что в задачу исследования входило определение возможных пределов замещения ДТ метанолом, методика предусматривала при снятии характеристик изменение подачи ДТ в цилиндры через топливный насос высокого давления и форсунку и увеличение подачи метанола при условии поддержания мощностных показателей дизеля на прежнем уровне. Иницирование дизеля проводилось при равных средних эффективных давлениях.

Результаты иницирования дизеля при подаче метанола на впуске приведены на рисунке 75, а. С увеличением количества подаваемого метанола угол, соответствующий периоду задержки воспламенения  $\varphi_d$ , увеличивается. Так, если у серийного дизеля при частоте вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  значение  $\varphi_d = 26$  град п.к.в., то при подаче 15% метанола

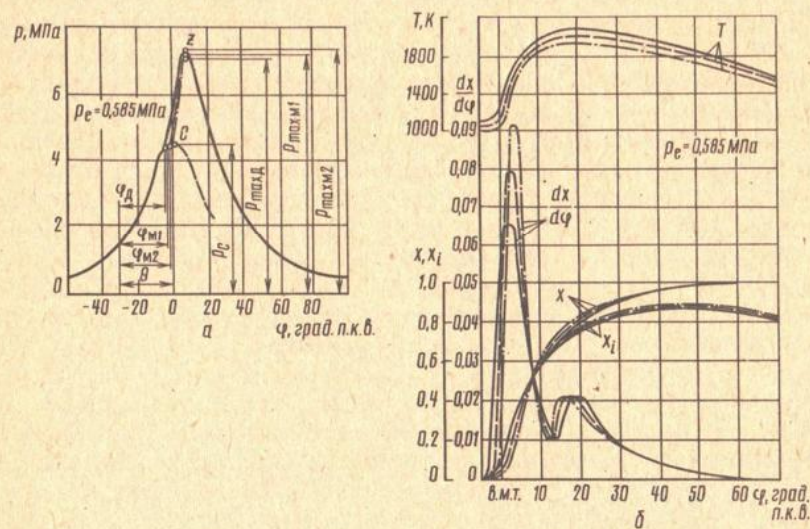


Рис. 75. Влияние подачи метанола на впуске на индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля Д-21А1 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

а — индикаторные диаграммы; б — графики динамики выделения тепла  $dx$ , усредненной температуры газов в цилиндре  $T$ , скорости отвода теплоты  $x$  и полезного выделения теплоты  $x_i$  в функции угла поворота коленчатого вала; — — — — — дизельный процесс; - - - - - и - - - - - с подачей 15 и 30% метанола на впуске

на впуске он составляет уже 27,5 град п.к.в., а при подаче 30% — 29 град. Вследствие этого возрастает и "жесткость" сгорания.

При работе по дизельному процессу  $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,496 \text{ МПа/град}$ , с подачей 15% метанола на впуске  $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,565 \text{ МПа/град}$ . и с подачей 30% — 0,599 МПа/град. При дальнейшем увеличении подачи метанола период задержки воспламенения еще больше возрастает, что влияет на скорость нарастания давления, которая при подаче метанола 40% на впуске достигает 0,675 МПа/град. Работа дизеля в этом случае сопровождается повышенным шумом и стуками. Поэтому при таком способе подачи метанола в цилиндры дизеля следует ограничивать количество подаваемого на впуске метанола до 30% к расходу основного топлива с целью сохранения показателей долговечности. При работе с подачей метанола на впуске несколько увеличивается  $p_{\max}$ . Так, при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  величина  $p_{\max d} = 7,25 \text{ МПа}$ ,  $p_{\max m1} = 7,29 \text{ МПа}$  и  $p_{\max m2} = 7,35 \text{ МПа}$ .

Из результатов обработки индикаторных диаграмм, проведенных с использованием ЭВМ ЕС-1020, видно (рис. 75, б), что характеристики тепловыделения и усредненная температура цикла в цилиндре изменяются при подаче метанола на впуске. Максимальная температура цикла  $T_{\max}$ , как и следовало ожидать, уменьшается. Так, при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$  при дизельном процессе  $T_{\max} = 1830,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , при подаче 15% метанола  $T_{\max} = 1834,3 \text{ }^\circ\text{C}$  и при подаче 30% метанола — 1669  $^\circ\text{C}$ .

По характеру протекания кривых выделения теплоты  $x$ , активного тепловыделения  $x_i$  и динамики использования теплоты  $dx/d\varphi$  видно, что выгорание топлива при подаче метанола на впуске начинается позднее, чем при дизельном процессе. Например, в ВМТ при работе по дизельному процессу доля активного тепловыделения составляет 0,1 от общего количества выделившейся теплоты. При подаче 15% метанола на впуске  $x_i = 0,06$ , а при подаче 30% —  $x_i = 0,03$ . Но по кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с подачей метанола на впуске ускоряется. Если для серийного дизеля  $(dx/d\varphi)_{\max} = 0,0660$ , то с подачей 15% метанола — 0,0794 и с подачей 30% метанола — 0,0923. В результате уже при  $\varphi = 7,5$  град значения  $x_i$  для обоих процессов одинаковы и составляют 0,48. К моменту достижения максимального значения усредненной температуры цикла в цилиндре при  $\varphi = 20$  град доля активного тепловыделения составляет 0,72... 0,73 при работе как на одном ДТ, так и при работе с подачей метанола на впуске. Таким образом, процесс сгорания для всех этих случаев заканчивается одновременно при  $\varphi = 62$  град. Увеличение максимальной скорости тепловыделения с подачей метанола на впуске связано с увеличением периода задержки воспламенения.

Анализ результатов иницирования дизеля показывает, что метанол нецелесообразно подавать на впуске в количестве более 30%, и поэтому все дальнейшие исследования проводились с учетом этого ограничения.

На рисунке 76, а представлены нагрузочные характеристики дизеля

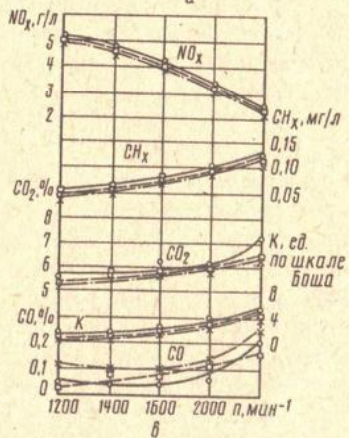
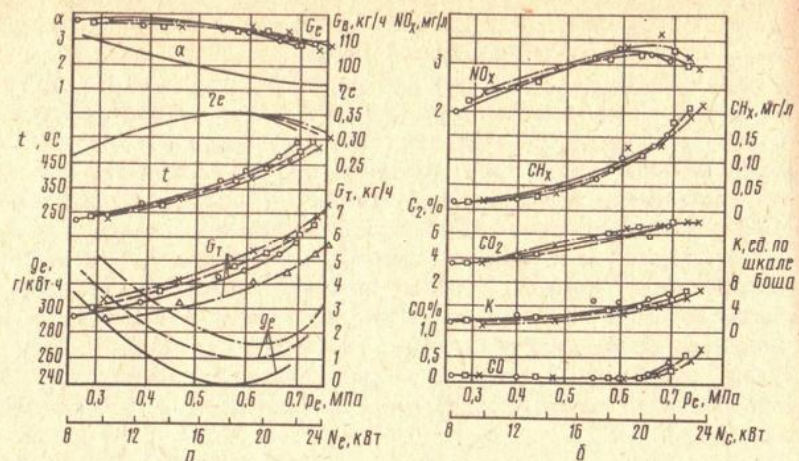


Рис. 76. Влияние подачи метанола на впуске на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1:

а — мощностные, экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; в — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения; — — — дизельный процесс; — — — и — — — с подачей 15 и 30% метанола на впуске

Д-21А1 при работе с подачей метанола на впуске при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ . Из графика видно, что во всем диапазоне изменения нагрузок увеличивается суммарный часовой расход топлива. Расход ДТ при этом уменьшается. Так, при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$  величина  $G_T = 4,5 \text{ кг/ч}$  для дизельного процесса, а с подачей 30% метанола на впуске —  $3,9 \text{ кг/ч}$ , т.е. снижение расхода ДТ за счет замены его метанолом составляет 13%. Удельный эффективный расход топлива также увеличивается: для дизельного процесса  $g_e = 242 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ , при подаче 15% метанола на впуске —  $264 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и при подаче 30% метанола —  $275 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ .

Увеличение часового и удельного эффективных расходов топлива объясняется тем, что теплота сгорания метанола в 2,2 раза ниже, чем у ДТ. Поэтому при подаче на впуске 30% метанола расход ДТ уменьшается только на 13%.

Из характера протекания кривой эффективен КПД  $\eta_e$ , который учитывает теплотворную способность топлива, видно, что значение его при подаче метанола на впуске не уменьшается, а на больших нагрузках даже выше. Это свидетельствует о лучшей организации рабочего процесса, о более эффективном сгорании ДТ в среде сжатой метано-воздушной смеси, чем в воздухе. Минимум удельного эффективного расхода топлива с подачей метанола также сдвигается в сторону больших нагрузок. Если при дизельном процессе  $g_{emin}$  достигается при  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$ , то с подачей 15% метанола при  $p_e = 0,625 \text{ МПа}$  и с подачей 30% метанола — при  $0,635 \text{ МПа}$ . Очевидно, на больших нагрузках в условиях высоких температур метанол диссоциирует на активные радикалы:  $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{OH}$ , которые будут инициировать начало цепной реакции.

При исследовании одновременно со снятием нагрузочных и скоростных характеристик определялись показатели токсичности ОГ. Влияние подачи метанола на впуске дизеля на содержание токсичных компонентов в ОГ в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  показано на рисунке 76, б, из графиков которого видно, что подача метанола на впуске дизеля в объеме 15 и 30% к расходу основного топлива не повышает содержание токсичных компонентов в ОГ, а содержание сажи несколько снижается.

Так, при увеличении нагрузки дизеля при работе по чисто дизельному процессу и  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ увеличивается с 1,95 до 3,25 мг/л, а при подаче 30% метанола — с 2,40 до 3,35 мг/л. При этом необходимо отметить, что максимум содержания  $\text{NO}_x$  при подаче метанола сдвигается в сторону больших нагрузок. Согласно термической природе образования оксидов азота, следовало бы ожидать уменьшения содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ, поскольку снижение температуры ОГ и усредненной температуры цикла свидетельствует о протекании рабочего процесса при меньшей температуре, чем у серийного дизеля. Однако концентрация  $\text{NO}_x$ , образующихся при сгорании, находится в зависимости от скорости тепловыделения и скорости нарастания давления. Результаты индицирования показали увеличение скорости тепловыделения и нарастания давления в процессе сгорания при подаче метанола на впуске. Таким образом, несмотря на меньшую температуру газов в цилиндре, количество  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля с подачей метанола не уменьшается, оставаясь практически на прежнем уровне.

Содержание сажи в ОГ дизеля при работе с подачей метанола снижается по сравнению с дизельным процессом во всем диапазоне нагрузок. Так, на номинальном режиме при  $p_e = 0,59 \text{ МПа}$  содержание сажи при дизельном процессе составляет 4,6 ед. по шкале Боша, при подаче 15% метанола на впуске — 3,8 ед., а при подаче 30% метанола — только 2,8 ед. Таким образом, снижение содержания сажи в ОГ дизеля при работе на метаноле составляет при подаче 15 и 30% метанола соответственно на 20 и 40% по сравнению с дизельным процессом. При этом необхо-

димо отметить, что максимальное значение содержания сажи в ОГ при работе на метаноле сдвигается в сторону больших нагрузок. При дизельном процессе оно соответствует  $p_e = 0,69$  МПа, при подаче метанола 15% — 0,726 МПа, при подаче 30% метанола — 0,76 МПа.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля при работе с подачей метанола на впуске в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала приведено на рисунке 76, в. С увеличением частоты вращения количество токсичных компонентов в ОГ дизеля возрастает, кроме оксидов азота (содержание  $NO_x$  уменьшается с 5,15 мг/л при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> до 2,4 мг/л при 2000 мин<sup>-1</sup>). Как видно из графиков, подача метанола во впускной трубопровод не ухудшает показатели токсичности дизеля на всех частотах вращения коленчатого вала. Содержание  $NO_x$  снижается незначительно, а при частоте 1200 мин<sup>-1</sup> концентрация их в ОГ дизеля одинакова при дизельном процессе и с подачей метанола.

Содержание сажи на всех частотах вращения с подачей метанола на впуске снижается. Причем если при  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup> это снижение составляло 35...40%, то на частоте 1200 мин<sup>-1</sup> оно составит 40% при подаче 15% метанола и 70% — при подаче 30% метанола на впуске. Таким образом, положительное влияние подачи метанола во впускной трубопровод на снижение сажесодержания и других токсичных компонентов в ОГ дизеля просматривается во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала.

Проведенные исследования по применению метанола в качестве топлива для дизеля указывают пути для расширения ресурсов моторных топлив. Подача метанола во впускной трубопровод до 30% позволяет замещать до 13% ДТ, не ухудшая мощностных, экономических и токсических показателей дизеля. При этом наблюдается снижение содержания сажи в ОГ в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и количества подаваемого метанола от 20 до 40%.

Рассмотренный способ наиболее целесообразно применять на дизелях, уже находящихся в эксплуатации, поскольку он не требует значительных конструктивных изменений и достаточно эффективен.

Подача метанола на впуске с помощью форсунки. Метанол может подаваться на впуске дизеля с помощью форсунки, как одноструйной, так и многоструйной. Кроме того, он может подаваться в различные моменты по углу поворота коленчатого вала. В работе [74] на дизеле "Навистар Интернэйшнл" с объемом 7,14 л, числом цилиндров 6, степенью сжатия 16,3, мощностью 125 кВт при 2500 мин<sup>-1</sup>, с неразделенной камерой и наддувом были исследованы несколько способов подачи метанола с помощью четырехдырчатой форсунки фирмы "Бендикс" с электронным управлением. Давление электромагнитной форсунки поддерживалось на уровне 10 МПа. Форсунка устанавливалась под углом 25° к вертикали с тем, чтобы максимально приблизить распылитель к впускному клапану. Метанол впрыс-

кивается с помощью насоса распределительного типа. Исследовались три варианта подачи метанола: раздвоенное впрыскивание — метанол впрыскивается по 50% на каждом обороте коленчатого вала; впрыскивание всей дозы метанола при открытом впускном клапане с моментом начала впрыскивания при положении поршня в ВМТ; впрыскивание всей дозы метанола при закрытых клапанах с моментом начала впрыскивания при 360 град п.к.в. в ВМТ. Продолжительность впрыскивания зависела от количества впрыскиваемого топлива. Импульс для начала впрыскивания поступал от трех равномерно расположенных в пространстве оптических датчиков. Исследования показали, что все три способа введения метанола в дизель влияют на величину  $p_z$ . Причем при двух последних способах при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> наблюдаются нарушения процесса сгорания из-за появления детонационных стуков. Многоструйное впрыскивание метанола с разделением дозы на две части на каждом обороте коленчатого вала является наиболее надежным.

Способы, влияющие на содержание токсичных компонентов в ОГ, мало чем отличаются один от другого. Общие закономерности сохраняются: с увеличением доли подачи метанола существенно снижается содержание  $NO_x$  в ОГ, а концентрация  $CH_x$  резко увеличивается, особенно на малых нагрузках, где подача метанола достигает 80%. Сопоставление закономерности изменения индикаторного КПД, скорости нарастания давления и содержания токсичных компонентов в ОГ в зависи-

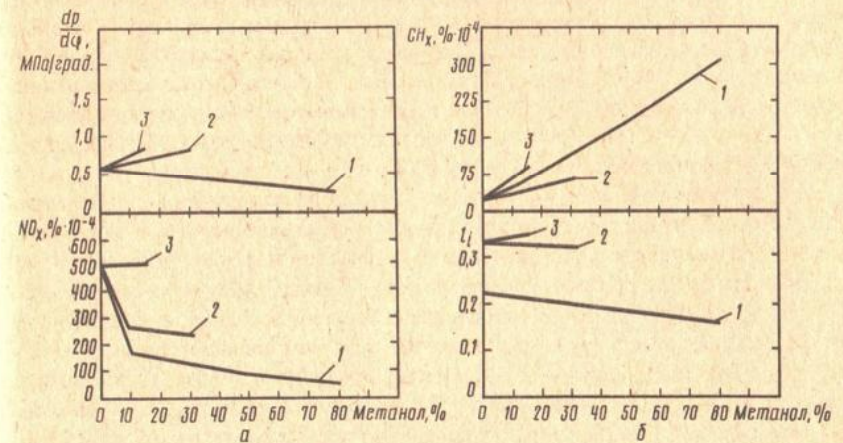


Рис. 77. Изменение показателей работы дизеля при впрыскивании метанола с помощью форсунки в зависимости от его количества:

а — изменение скорости нарастания давления в цилиндре и относительное изменение содержания  $NO_x$  в ОГ; б — относительное изменение содержания  $CH_x$  в ОГ и изменение индикаторного КПД; 1 — при  $p_e = 0,827$  МПа; 2 — при  $p_e = 0,528$  МПа; 3 — при  $p_e = 0,176$  МПа



мости от нагрузки и количества подаваемого метанола представлено на рисунке 77. Содержание  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_x$  дано в соотношении к содержанию  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_x$  при дизельном процессе. Из графиков видно, что если содержание  $\text{NO}_x$  при подаче метанола снижается от 10 до 100%, то  $\text{CH}_x$  увеличиваются по сравнению с дизельным процессом от 2...2,5 раз при больших нагрузках до 12 раз при малых и подаче метанола 80% независимо от способа его впрыскивания.

Подача метанола на впуске дизеля в виде пара в диссоциированном виде. Метанол можно вводить во впускной трубопровод не в жидком виде, а в виде продуктов его разложения — водорода и окиси углерода:  $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}$ .

При утилизации теплоты охлаждающей жидкости и ОГ на данную эндотермическую реакцию появляется необходимость увеличить на 15...17% выделение тепла по сравнению с низшей теплотой сгорания исходного продукта — метанола. Для дизеля K461M1 (6ЧН 12/14) с наддувом была осуществлена подача метанола в диссоциированном виде [52]. Подача метанола осуществлялась перед турбокомпрессором с помощью отдельной системы с предварительным его испарением и каталитическим разложением. Тепло ОГ утилизировалось и использовалось для испарения метанола. При подаче продуктов разложения метанола было получено улучшение экономических показателей. Они приведены в таблице 33.

### 33. Влияние подачи метанола на экономичность дизеля

| Параметр  | Значение параметра при нагрузке двигателя, % |      |      |      |
|---|--|------|------|------|
|   | 25   | 50   | 75   | 100  |
| Увеличение расхода смеси при различных добавках метанола, %:              |  |      |      |      |
| 10  | 2,7  | 2,7  | 2,0  | 0    |
| 30  | 8,3  | 12,9 | 15,3 | 12,7 |
| 50  | 25,0   | 25,0 | 27,3 | 23,4 |
| Уменьшение расхода дизельного топлива при различных добавках метанола, %: |  |      |      |      |
| 10  | 5,6  | 7,4  | 7,3  | 8,7  |
| 30  | 11,3   | 13,9 | 14,0 | 16,3 |
| 50  | 18,3   | 20,4 | 21,3 | 26,0 |

Вследствие почти вдвое меньшей теплоты сгорания метанола по сравнению с ДТ при его добавлении по массе в пределах 10...50% и сохранении эффективных показателей расход рабочей смеси увеличился на 2,7...25% при одновременном снижении расхода ДТ на 18...26%. Характер нагрузочных токсических характеристик по саже, CO,  $\text{CH}_x$  и  $\text{NO}_x$  (рис. 78) по сравнению с дизельным процессом не изменился. Вместе

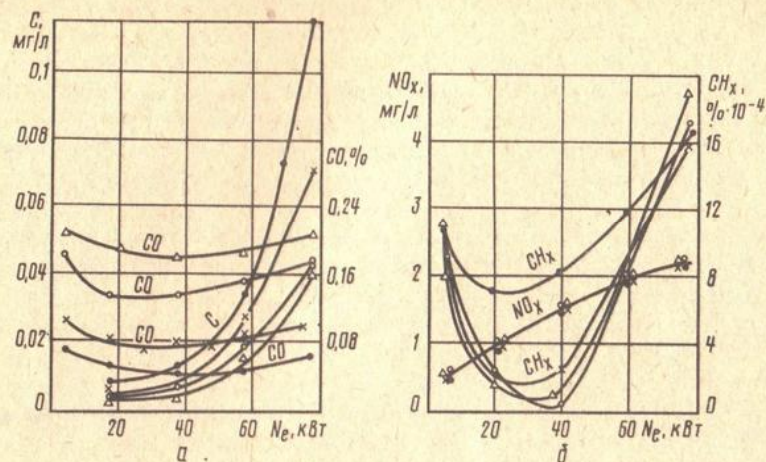


Рис. 78. Влияние подачи метанола на впуске дизеля в диссоциированном виде на токсичность ОГ в зависимости от нагрузки:

*a* — для сажи и  $\text{NO}_x$ ; *б* — для  $\text{CH}_x$  и  $\text{NO}_x$ ; ● — дизельный процесс; X, O и Δ — при подаче метанола в количестве 10, 30 и 50% соответственно

с тем концентрация сажи в ОГ снизилась в 3 раза во всем диапазоне располагаемых нагрузок при добавлении 50% метанола. Несколько увеличилось содержание CO. Концентрации  $\text{NO}_x$  остались без изменений,  $\text{CH}_x$  — уменьшились в 4...5 раз в области средних нагрузок, оставаясь в первом приближении без изменений на нагрузках, близких к холостому ходу и номинальной нагрузке.

Анализ индикаторных диаграмм показал, что присадка продуктов разложения метанола увеличивает термодинамический и индикаторный КПД за счет увеличения доли топлива, сгорающего при  $v = \text{const}$ . Работа двигателя при добавлении метанола в виде продуктов его разложения в количестве до исследованных 50% по массе устойчива на постоянных и переменных нагрузках. Изменения пусковых характеристик не замечено.

Технико-экологические показатели могут быть улучшены корректировкой на оптимум угла опережения впрыскивания топлива, применением каталитических нейтрализаторов. При установке на агрегат дизель с раздельной подачей жидкого топлива и продуктов разложения метанола может эксплуатироваться как на традиционном топливе, так и с присадкой метилового спирта без изменения регулировок.

Подача метанола с помощью двойной системы топливоотдачи в жидком виде непосредственно в цилиндры стандартной форсункой. Такая система подачи метанола в цилиндры позволяет подавать через штатную систему топливоподачи метанол в больших количествах (до 90%), а через до-

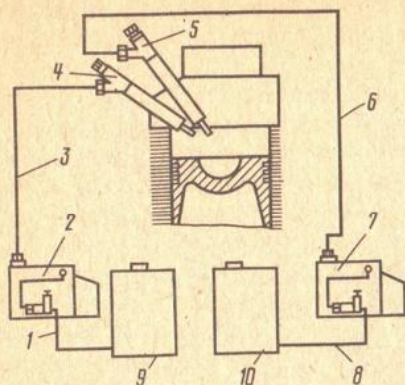


Рис. 79. Принципиальная схема двойной системы топливоподачи метанола в цилиндры дизеля:

1 и 3 — топливопроводы низкого и высокого давления для подачи ДТ; 2 и 7 — ТНВД для подачи ДТ и метанола; 4 и 5 — форсунки для подачи ДТ и метанола; 6 и 8 — топливопроводы высокого и низкого давления для подачи метанола; 9 и 10 — топливные баки для ДТ и метанола

полнительную систему питания впрыскивать в цилиндр лишь запальную дозу ДТ.

Этот метод имеет ряд преимуществ: значительная экономия нефтяного топлива, отсутствие серьезных конструктивных изменений, что позволяет использовать существующие двигатели, эффективное снижение токсичности ОГ, особенно по  $\text{NO}_x$  и саже.

Принципиальная схема двойной системы топливоподачи приведена на рисунке 79.

В Кировском СХИ были проведены работы по переводу дизеля Д-21А1 трактора Т-25А на метанол с использованием такой системы [53]. Метанол подается топливным насосом УТН-5А через штатную форсунку. Для подачи запальной порции ДТ в цилиндр на дизеле смонтирован второй топливный насос УТН-5А, а в цилиндре с помощью шпилек в отверстии головки, просверленном ниже места установки основной форсунки, но в одной с ней вертикальной плоскости, установлена дополнительная штифтовая форсунка ФШ 6 = 2×25. Это позволяет при соответствующей разнице установочных углов опережения впрыскивания ДТ и метанола подавать метанол в факел распыленного ДТ и способствует лучшей организации воспламенения метанола в цилиндре.

Пуск и прогрев дизеля осуществлялся на ДТ, после чего включалась подача метанола, а подача ДТ уменьшалась. Эксперименты показали, что на номинальном скоростном и нагрузочных режимах для обеспечения устойчивой работы дизеля (без перебоев и пропусков воспламенения) достаточно подавать не менее 10% запального ДТ от суммарного расхода топлива.

В дальнейшем подача запального топлива оставалась постоянной, а все регулирование нагрузки происходило за счет изменения цикловой подачи метанола.

Результаты индицирования дизеля при работе с подачей метанола непосредственно в цилиндры и воспламенением от запальной порции ДТ показывают существенное снижение максимального давления сгорания

$p_{\max}$ . При работе на ДТ (рис. 80, а) на частоте вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  значение  $p_{\max \text{д}} = 7,25 \text{ МПа}$ , а при работе на метаноле  $p_{\max \text{м}} = 6,58 \text{ МПа}$ . Соответственно и значения  $(dp/d\varphi)_{\max}$  при работе на ДТ составляют  $0,496 \text{ МПа/град}$ , а при работе на метаноле —  $0,382 \text{ МПа/град}$ . При этом следует отметить, что процесс сгорания при работе на метаноле несколько сдвигается на линию расширения. Если при работе на ДТ максимальное давление цикла достигается при  $\varphi = 7 \text{ град п.к.в.}$ , то при работе на метаноле — при  $\varphi = 10,5 \text{ град п.к.в.}$

Из результатов обработки индикаторных диаграмм видно, что характеристики тепловыделения и осредненная температура цикла в цилиндре изменяются при работе дизеля на метаноле (рис. 80, б). Максимальное значение осредненной температуры цикла сдвигается вправо. При  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$  максимальная осредненная температура цикла при работе на ДТ составляет  $T_{\max \text{д}} = 2103 \text{ К}$  и наблюдается при  $\varphi = 20 \text{ град п.к.в.}$ , а при работе на метаноле  $T_{\max \text{м}} = 2075 \text{ К}$  при  $\varphi = 32 \text{ град п.к.в.}$  Начиная с угла  $\varphi = 28 \text{ град}$ , значения температуры цикла двигателя, работающего на метаноле, выше, чем у серийного дизеля.

Для дизеля, работающего на метаноле с воспламенением от запальной порции топлива, характерно уменьшение первого пика на графике динамики тепловыделения и сдвиг его вправо по углу поворота коленчатого вала дизеля. Если для серийного дизеля максимум скорости тепловыделения  $(dx/d\varphi)_{\max} = 0,0660$  наблюдается при  $\varphi = 2 \text{ град}$ , то для дизеля, работающего на метаноле,  $(dx/d\varphi)_{\max} = 0,499$  при  $\varphi = 7,5 \text{ град}$ .

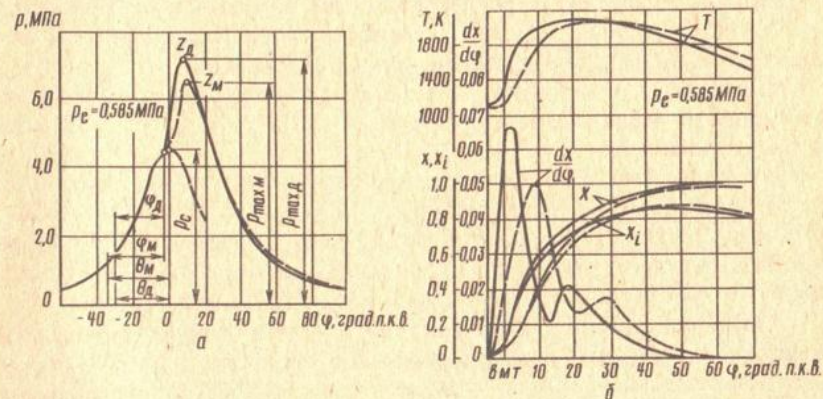


Рис. 80. Влияние подачи метанола с помощью двойной системы топливоподачи на индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля Д-21А1 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

а — индикаторные диаграммы; б — графики динамики выделения теплоты  $dx$ , усредненной температуры газов в цилиндре  $T$ , скорости отвода теплоты  $x$  и полезного выделения теплоты  $x_i$  в функции угла поворота коленчатого вала; — — — — дизельный процесс; - - - - - с подачей метанола

Из графика выделения теплоты  $x$ , активного тепловыделения  $x_i$  и динамики использования теплоты видно, что выгорание топлива при работе дизеля на метаноле в первой фазе сгорания имеет плавный характер, более равномерный, без резких повышений скорости тепловыделения. Величина  $x_i = 0,46$ , соответствующая  $p_{max}$ , при работе на ДТ достигается при  $\varphi = 7$  град п.к.в. При работе на метаноле значению  $p_{max}$  соответствует почти такое же значение  $x_i = 0,45$ , но достигается оно уже при  $\varphi = 10,5$  град. Во второй фазе при угле  $\varphi = 20$  град, соответствующем максимальной осредненной температуре цикла,  $x_i = 0,72$  для серийного дизеля, а для работающего на метаноле дизеля при  $\varphi = 32$  град, соответствующем  $T_{max} - x_i = 0,79$ , т.е. тепловыделение в данном случае идет более активно. Это также подтверждается и тем, что скорость тепловыделения при работе на метаноле выше, чем у серийного дизеля, начиная с угла  $\varphi = 5$  град п.к.в. Сгорание в результате заканчивается почти одновременно с разницей в 4 град ( $\varphi_D = 62$  град, а  $\varphi_M = 66$  град).

Снижение максимальной скорости тепловыделения и более плавный характер протекания процесса при работе дизеля на метаноле связаны с тем, что здесь, очевидно, отсутствует самовоспламенение (исключая ДТ, доля которого незначительна), т.е. в данном случае дизель можно отнести к двигателям с принудительным воспламенением, у которых скорость тепловыделения в начале сгорания увеличивается. Так как метанол впрыскивается в горящий факел и у него не накапливается паровая фаза, обуславливающая задержку воспламенения, метанол воспламеняется сразу при соприкосновении с горящим запальным топливом и сгорает постепенно по мере впрыскивания и поступления в цилиндр. Снижение скорости тепловыделения является также причиной снижения скорости нарастания давления процесса сгорания.

Рассмотренные особенности протекания рабочего процесса у дизеля при работе на метаноле с запальной порцией ДТ не ухудшают его мощностных показателей.

На рисунке 81, а представлена нагрузочная характеристика дизеля при работе на ДТ и на метаноле при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ . Из графика видно, что для достижения таких же мощностей, как и при работе на ДТ, при работе на метаноле часовой расход топлива возрастает в два раза. Так, для серийного дизеля на  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$  значение  $G_T = 4,5 \text{ кг/ч}$ , а у дизеля, работающего на метаноле с подачей запальной порции ДТ, суммарный расход топлива  $G_{\Sigma} = 8,5 \text{ кг/ч}$ . При этом расход запального топлива  $G_{д.з.}$ , как отмечалось, при постоянной частоте вращения на всех нагрузочных режимах не меняется.

Мощность дизеля регулируют только изменением подачи метанола. В связи с этим на малых нагрузках процент расхода ДТ будет больше. При  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,32 \text{ МПа}$  суммарный расход топлива  $G_{\Sigma} = 5,7 \text{ кг/ч}$ , а расход ДТ —  $1 \text{ кг/ч}$ , или 17,5%. На больших нагрузках, например при  $p_e = 0,655 \text{ МПа}$ , суммарный расход топлива возрастает до  $10,4 \text{ кг/ч}$ . Расход ДТ, оставаясь на уровне  $1 \text{ кг/ч}$ , составит лишь 9,6%.

При сравнении с расходом топлива серийного дизеля экономия расхода ДТ на номинальном режиме составляет 77%. На максимальных нагрузках при  $p_e = 0,69 \text{ МПа}$  экономия ДТ составляет 80%.

Удельный эффективный расход топлива при работе на метаноле также увеличивается в два раза по сравнению с серийным дизелем  $g_{emin \Sigma} = 470 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  против  $g_{emin} = 240 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ . Это объясняется низкой теплотой сгорания метанола по отношению к ДТ. Эффективный КПД  $\eta_e$  при этом не ниже значений для серийного дизеля. Температура ОГ при работе на метаноле остается на том же уровне, что и у дизеля, работающего на ДТ.

Одновременно со снятием нагрузочных и скоростных характеристик определялись показатели токсичности ОГ. Изменения токсичности и дымности ОГ при работе дизеля на метаноле по сравнению с серийным

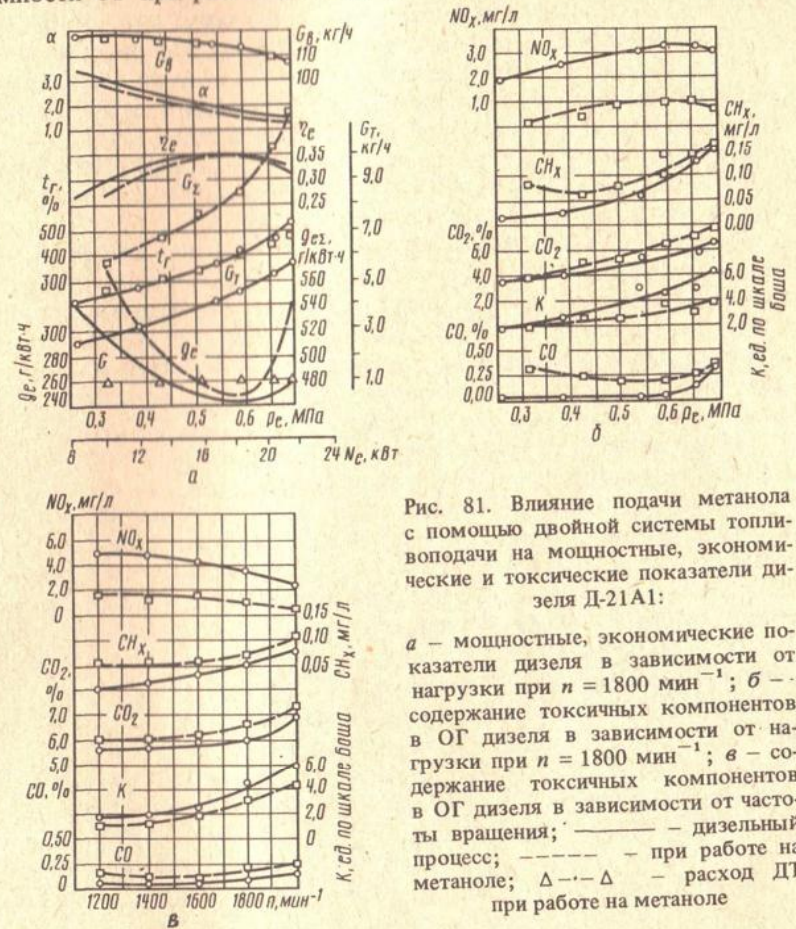


Рис. 81. Влияние подачи метанола с помощью двойной системы топливopодачи на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1:

а — мощностные, экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; в — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения; — — — — — дизельный процесс; — — — — — при работе на метаноле;  $\Delta$  — —  $\Delta$  — расход ДТ при работе на метаноле

дизелем в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , а также от скоростного режима показаны на рисунке 81, б и в.

Из графиков видно, что при работе дизеля на метаноле содержание некоторых токсичных компонентов в ОГ заметно снижается. Так, при увеличении нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе дизеля на ДТ увеличивается от 1,95 до 3 мг/л с максимальным значением 3,25 мг/л при  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$ . При работе на метаноле содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ изменяется при изменении нагрузки от 0,3 до 0,7 мг/л с максимальным содержанием 1 мг/л при  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$ . На номинальном режиме содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снижается при работе на метаноле с 3,25 до 1 мг/л, в 3,25 раза.

Такое резкое снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ объясняется тем, что скорость тепловыделения и нарастания давления у дизеля, работающего на метаноле, значительно ниже, чем у серийного, что подтверждается уменьшением первого и увеличением второго пика динамики тепловыделения, а также смещением их вправо по углу поворота коленчатого вала. Эти факторы являются определяющими в образовании  $\text{NO}_x$  при сгорании топливовоздушной смеси в цилиндре.

Содержание сажи в ОГ при изменении нагрузки при работе на ДТ увеличивается с 1,6 до 6,2 ед. по шкале Боша, при работе на метаноле и изменении нагрузки — от 2 до 3,8 ед. по шкале Боша.

Таким образом, на малых нагрузках содержание сажи в ОГ при работе на различных топливах возрастает и при максимальных значениях достигает разницы в 38,7%. В первую очередь это объясняется меньшим содержанием в топливе углерода и большим — кислорода, что приводит к ухудшению условий для крекинга и, следовательно, снижает содержание сажи и твердых частиц в ОГ дизеля, работающего на метаноле.

Содержание в ОГ дизеля других токсичных компонентов ( $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ) при работе на метаноле несколько выше на малых и средних нагрузках по сравнению с работой на ДТ, однако с дальнейшим увеличением нагрузки их содержание в ОГ выравнивается и достигает значений, близких к серийному дизелю. Так, содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ при  $p_e = 0,69 \text{ МПа}$  и  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  составляет 0,170 мг/л при работе на метаноле и 0,160 мг/л — на ДТ. Содержание  $\text{CO}$  в обоих случаях при этой же нагрузке составляет 0,35% по объему. Содержание  $\text{CO}_2$  увеличивается при работе на метаноле до 7,8 против 6,6 при работе на ДТ. С увеличением частоты вращения количество токсичных компонентов в ОГ дизеля при работе на различных видах топлива увеличивается, исключая  $\text{NO}_x$ , содержание которых снижается при работе на ДТ с 4,8 мг/л при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до 2,4 мг/л при  $2000 \text{ мин}^{-1}$ . При работе на метаноле содержание  $\text{NO}_x$  снижается с 1,6 мг/л при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до 0,6 мг/л при  $2000 \text{ мин}^{-1}$ . Как видно из графиков, снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе дизеля на метаноле характерно для всех исследуемых частот вращения. В процентном отношении снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ

при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  составляет 66,6%, а при  $2000 \text{ мин}^{-1}$  — 75%. Аналогично снижается при работе на метаноле и содержание сажи в ОГ по сравнению с работой на ДТ — на 30...40% в зависимости от скоростного режима.

Вместе с тем во всем исследуемом диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля наблюдается увеличение содержания  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  при работе на метаноле по сравнению с серийным дизелем. Однако в количественном отношении увеличение содержания токсичных компонентов мало. Так, для  $\text{CH}_x$  это увеличение составляет для  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  0,05 мг/л, а при  $1800 \text{ мин}^{-1}$  — всего 0,025 мг/л. Для  $\text{CO}$  увеличение составляет при работе дизеля на метаноле при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  0,125%, а при  $1800 \text{ мин}^{-1}$  — 0,11%. Для  $\text{CO}_2$  увеличение при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  равно 0,4%, а при  $1800 \text{ мин}^{-1}$  — 0,6%.

На дизелях Д-21А1 с полусферической КС при подаче метанола непосредственно в камеру с помощью двойной системы топливоподдачи возможно получение мощностных показателей на уровне серийного дизеля при использовании до 10% запального (дизельного) топлива и 90% метанола, чем достигается экономия до 80% ДТ, снижение содержания в ОГ оксидов азота в 3,25 раза и сажи — до 38%. Двойная система топливоподдачи требует установки дополнительной форсунки на каждый цилиндр и дополнительного ТНВД для подачи запального топлива. Штатная топливная система используется для подачи метанола. Для установки двойной системы топливоподдачи не требуются значительные конструкционные изменения, и она может быть реализована на дизелях, находящихся в эксплуатации.

В Кировском СХИ на основе двойной системы топливоподдачи создан опытный образец трактора Т-25А. Система питания предусматривает как работу на метаноле с запальной порцией ДТ, так и на одном ДТ. Рейка топливного насоса, подающего ДТ, стопорится на запальной дозе с помощью электромагнитного клапана, управляемого из кабины трактора. Основной бак из-под ДТ используется для метанола, а для запального ДТ установлен дополнительный бак под капотом трактора вместимостью 10 л. Воздухоочиститель при этом вынесен слева от кабины. Общий вид трактора представлен на рисунке 82.

Основные направления исследований по применению метанола в качестве топлива для дизелей в СССР. Работы по изучению применения метанола в качестве топлива для дизелей у нас в стране должного развития пока не получили. В основном работы находятся на этапе стендовых испытаний, в фазе постановки задач. Определенных результатов добились в МИИТе и НАМИ. На ВДНХ СССР в 1987 г. Кировский СХИ демонстрировал трактор Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на метаноле, с замещением метанолом до 80% ДТ.

Такое положение вызвано тем, что, с одной стороны, при прове-

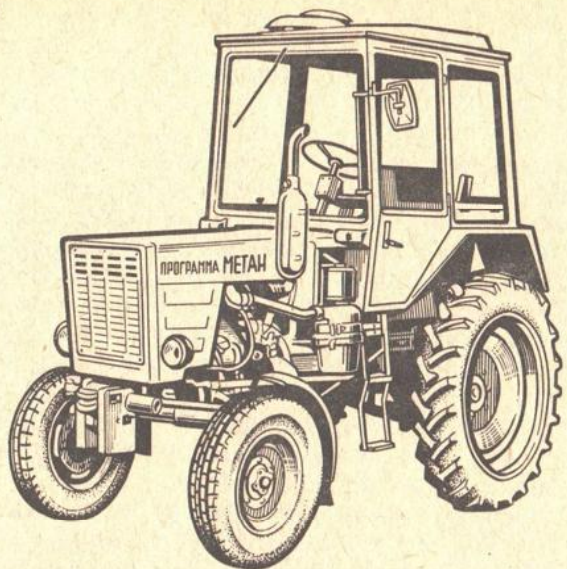


Рис. 82. Общий вид трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на метаноле

дении работ встречаются трудности по организации воспламенения метанола вследствие его специфических физико-химических свойств, а с другой — отсутствие четко сформулированных направлений научных исследований.

Весь объем исследований можно условно подразделить на две области. Это области стендовых и эксплуатационных исследований. После завершения стендовых необходимо проводить эксплуатационные исследования возможности использования метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей. Структурная схема исследований представлена на рисунке 83.

Стендовые исследования необходимо производить на всех моделях дизелей, особенно имеющих конструктивные отличия (вихрекамерных, с КС в поршне). На каждом из них интерес будет представлять исследование применения турбонаддува, поскольку совместное взаимодействие применения метанола и турбонаддува пока еще мало изучено.

При проведении стендовых исследований важно правильно выбрать и исследовать способ подачи метанола в дизель, поскольку в настоящее время имеется значительное количество различных методов для его подачи. Они позволяют подавать метанола от 10 до 90%, однако на каждом двигателе в зависимости от условий можно реализовать разные методы и эффективность их будет различной. Кроме этого, применение способов требует и разной сложности конструктивных изменений в ди-

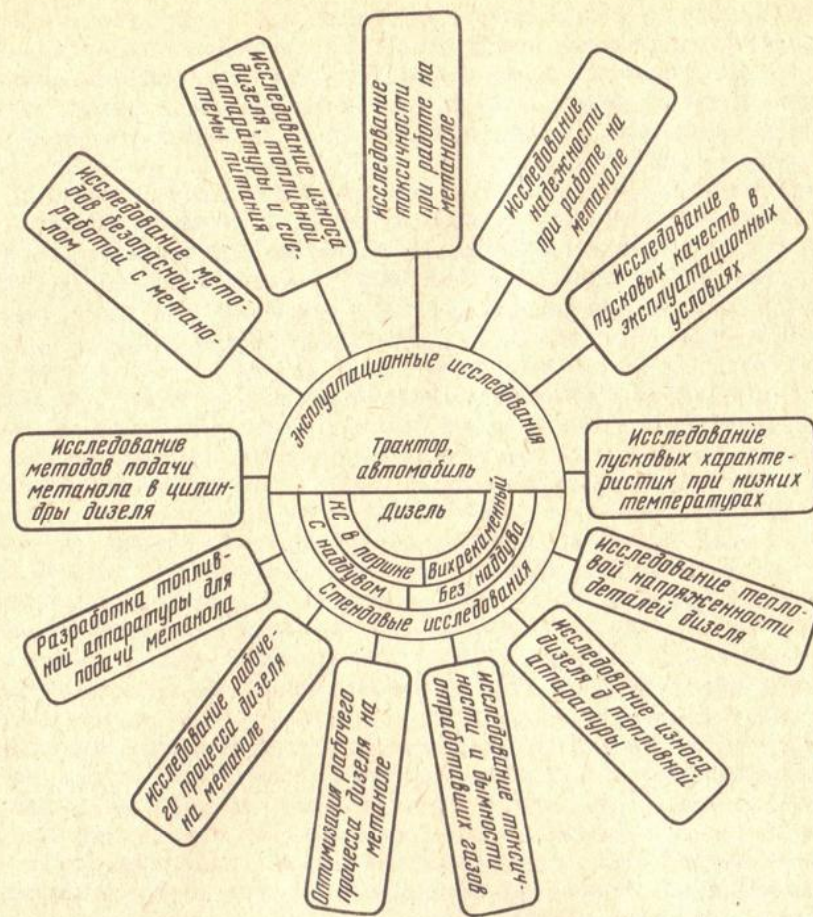


Рис. 83. Структурная схема основных направлений исследований по применению метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей

зеле для их реализации. В процессе исследований могут быть выбраны такие методы подачи метанола в дизель, которые потребуют разработки специальной топливной аппаратуры и приборов. Такая аппаратура должна быть создана и на ней необходимо провести исследования работы системы подачи метанола.

При реализации выбранного способа подачи метанола и аппаратуры необходимо провести исследования рабочего процесса дизеля при работе на метаноле. При этом особый интерес представляет влияние метанола на процесс сгорания дизеля, характеристики тепловыделения, температу-

ру в цилиндре, "жесткость" работы, период задержки воспламенения, влияние закона подачи топлива, давления впрыскивания и т.д. Интерес представляют исследования по оптимизации рабочего процесса дизеля при работе на метаноле с целью получения наибольшего эффекта по количеству подаваемого метанола, а также по наибольшему снижению токсичности и дымности ОГ.

Параллельно работам по изучению рабочего процесса и его оптимизации при работе на метаноле необходимо провести исследования токсичности и дымности ОГ. Здесь интерес будет представлять влияние метанола на снижение содержания  $\text{NO}_x$  и сажи. Необходимо изучить влияние на изменение содержания в ОГ альдегидов и БП, поскольку в имеющейся литературе встречаются противоречия по этому вопросу.

Отдельным направлением в исследованиях будет изучение тепловой напряженности деталей дизеля при работе на метаноле. Высокая теплота испарения метанола и давление насыщенных паров приводят к тому, что снижается температура газов в цилиндре и, следовательно, температура основных деталей ЦПГ. Это создает предпосылки для форсирования дизеля по среднему эффективному давлению и частоте вращения. Вопрос этот почти не изучен и требует серьезного внимания.

Неизученным пока является также влияние метанола на износ дизеля и его топливной аппаратуры. Подробное изучение этого вопроса дает четкие рекомендации по ограничению количества метанола, подаваемого в цилиндры дизеля, что позволит разработать пути сокращения износа при работе на метаноле.

Очень важным является определение пусковых характеристик дизеля, работающего на метаноле, при низких температурах окружающей среды, поскольку для метанола характерно плохое самовоспламенение, и при этих условиях пуск дизеля становится одним из определяющих показателей. В процессе этой работы возможно создание устройств и приспособлений, облегчающих запуск дизеля на метаноле и улучшающих его самовоспламенение, а также соответствующих присадок.

При окончании стендовых исследований необходимо провести эксплуатационные исследования работы автомобиля или трактора на метаноле. Эти исследования требуют значительных материальных затрат, но дают полную картину возможности эксплуатации на метаноле с разработанной системой его подачи.

В связи с тем что метанол требует особого обращения вследствие повышенной токсичности, в первую очередь необходимо развернуть исследования методов безопасной работы с ним. Это целое направление представляется отдельным, требующим при разработке участия и гигиенистов, и специалистов по охране труда и технике безопасности. Здесь необходимо рассмотреть методы ремонта, разборки и сборки топливной аппаратуры, заправки и хранения метанола, исключая случаи отравления.

Интерес представляют изучение износа двигателей, топливной аппаратуры, системы подачи метанола при работе в условиях рядовой эксплуатации. Как поведет себя метанол при длительной эксплуатации, как будет влиять на хранение техники, какие методы надо разработать с учетом работы на метаноле — эти вопросы по автотракторным дизелям не изучались.

Возможно, что присутствие дополнительных систем для подачи метанола, его повышенная по сравнению с ДТ коррозионная активность снизят в целом надежность транспорта, работающего на метаноле. Отсутствие достоверных данных по надежности транспорта, эксплуатирующегося на метаноле, определяет актуальность и важность этого направления исследований. Параллельно проведению этих работ необходимо изучить пуск дизеля в эксплуатационных условиях, особенно в условиях низких температур, провести испытания систем для улучшения пуска и самовоспламенения метанола.

Предложенные основные направления научных исследований по применению метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей не исключают проведения других исследований, позволяющих дать ответ и на различные вопросы использования метанола, поскольку они базируются на первостепенных задачах, решить которые необходимо в первую очередь, но которые тесно взаимосвязаны и с другими, не менее важными и возникающими уже в самом процессе работы в этом направлении вопросами. Проведение всего объема предложенных исследований хотя бы для одной модели автомобиля или трактора позволит дать ответ на многие, кажущиеся сейчас спорными вопросы и создаст твердую научную платформу для дальнейшего углубления исследований по применению метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей.

Применение метанола для дизелей за рубежом.

В Калифорнии (США) на различных уровнях прорабатываются варианты решения топливной проблемы, и в том числе применения в дизелях метанола. Этот вариант, как считают эксперты, имеет большие потенциальные возможности. Замена на метанол ДТ позволила бы устранить все более обостряющуюся проблему твердых частиц в атмосфере. Полный перевод транспорта на метанол привел, как считается, к частичному восстановлению характеристик слоя озона в атмосфере, оцениваемому в 40...80% от того эффекта, который дало бы полное устранение выбросов ОГ от транспорта в атмосферу. Стоимость метанола сопоставима (по энергетическому критерию) со стоимостью легкого нефтяного топлива. Предполагается, что к 2000 г. стоимость легкого нефтяного топлива в США возрастет настолько, что питание ДВС метанолом станет экономически выгодным.

Вопросами применения метанола в дизелях занимаются ведущие моторостроительные фирмы: "Рикардо" (Англия), "Джон Дир", "Катерпиллар", "Дженерал Моторс" (США), "Коматсу" (Япония), "Бурмай-

стер и Вайн" (Дания), "Сааб Скания", "Волво" (Швеция), "Фольксваген", "Даймлер-Бенц", МВМ, КГД, MAN (ФРГ) и др., а также исследовательские центры: Миссурийский университет, Юго-Западный исследовательский институт, Иллинойский университет (США), Технологический институт г. Ахена (ФРГ), Институт механики Триестского университета (Италия), Иоганнесбургский университет (ЮАР) и др. [46...49].

Имеются сведения о результатах стендовых и дорожных испытаний грузового автомобиля с дизелем, у которого метанол подавался во впускной трубопровод через эмульгирующую вставку в количестве 30%. При этом возрастал КПД дизеля и снижалась токсичность ОГ. Пуск дизеля осуществлялся на ДТ, а перед остановкой подача метанола прекращалась заранее.

При подаче метанола во впускной трубопровод с помощью карбюратора у четырехтактного четырехцилиндрового дизеля "Standart-20" заменялось до 32% дизельного топлива. Дизель объемом 2,12 л имел отдельную КС и степень сжатия 20,5. Метанол подавался с помощью карбюратора "Solex". Дорожные испытания, проведенные на микроавтобусе с контрольной нагрузкой при постоянных скоростях движения, показали, что при скорости 30...40 км/ч удельный расход энергии оказался одинаковым при работе с метанолом и без него, а при скорости 50...60 км/ч имела экономия до 4,4% при работе дизеля с метанолом, которым замещалось от 8 до 44% дизельного топлива.

Фирма "Даймлер-Бенц" создала на базе газового варианта дизеля с неразделенной КС двигатель для работы на метаноле, предварительно испаренном в теплообменнике, оборудованный искровой системой зажигания.

Фирма "Коматсу" (Япония) и Юго-Западный исследовательский институт (США) провели анализ работы одноцилиндрового отсека дизеля "Komatsu-105" с объемом 1,08 л, отношением  $S/d = 125/105$ , степенью сжатия 16 на чистом метаноле и эмульгированной смеси метанола и 20% дизельного топлива. Для воспламенения смеси использовалась серийная свеча зажигания "Champion". Длительность искрового разряда регулировалась до 180 град п.к.в., начало разряда — механическим прерывателем. Для устойчивой работы дизеля в широком диапазоне нагрузок и частот вращения необходимо, чтобы искровой промежуток находился на боковой поверхности одной из струй впрыскиваемого топлива, где состав топливовоздушной смеси близок к стехиометрическому. Расстояние от искрового промежутка свечи зажигания до сопла распылителя форсунки составило для данного дизеля 14 мм.

Для топлива с 20% метанола искровое зажигание требовалось для пуска и прогрева дизеля. На чистом метаноле дизель устойчиво работал только с использованием искрового зажигания.

Исследования проводились на одноцилиндровом дизеле с разделенной КС фирмы "Джон Дир" с рабочим объемом 0,876 л и степенью сжатия 16,8 и четырехцилиндровом дизеле этой же фирмы с неразделен-

ной камерой и турбонаддувом с рабочим объемом 3,9 л и степенью сжатия 16,5. Для испытаний использовались топлива, содержащие 80% ДТ, 10...98% метанола и 10% гексанола; 77,5% ДТ, 15...95% метанола и 7,5% гексанола. Испытания носили сравнительный характер и ставили перед собой задачу выявить зависимость между типом дизеля, применяемым топливом и токсичностью ОГ. Так, установлено, что для топлива, содержащего метанол, на обоих дизелях дымность ОГ и количество сажевых частичек значительно меньше. Вместе с тем содержание  $NO_x$  в ОГ несколько выше. Исследователи объясняют рост  $NO_x$  в ОГ более длительным периодом задержки воспламенения этого топлива и более трудным его сгоранием.

В Триестском университете (Италия) проведены исследования по использованию в качестве топлива для дизелей смеси из газойля с метанолом. В качестве присадки, улучшающей самовоспламенение заряда, использовался изопропилинитрит. Исследования проводились на одноцилиндровом дизеле с предкамерным смесеобразованием. Верхний предел работы дизеля на газойлеметанольной смеси ограничивается содержанием 35% метанола. Дальнейшие исследования проводились на серийном дизеле с неразделенной КС без наддува мощностью 75 кВт и степенью сжатия 16 и с наддувом мощностью 95 кВт. Впрыскивание топлива проводилось под давлением 20,6 МПа при постоянном угле опережения впрыскивания топлива 21 град п.к.в. до ВМТ. Исследования показали, что удельный расход повышается с увеличением частоты вращения и содержанием метанола в топливе. Добавление присадки в количестве до 1% повышает мощность дизеля на 6%. Добавление присадки целесообразно только в определенных пределах из-за охлаждения заряда цилиндра и снижения эффекта от повышения цетанового числа. При работе дизеля с наддувом и подаче метанола до 30% концентрация СО в ОГ изменяется только в определенном диапазоне частот вращения, концентрация  $CH_x$  несколько возрастает. Присадка для ускорения самовоспламенения топлива оказывает благоприятное влияние на снижение дымности ОГ.

Для самой массовой модели дизеля фирмой "Катерпиллар" разработан способ организации процесса сгорания, обеспечивающий использование в качестве топлива чистого метанола. Поскольку воспламенение метанола наблюдалось только при нагрузках, превышающих 60% от максимальных, была использована свеча накаливания. Вторым фактором, обеспечивающим стабильность воспламенения метанола, стало введение в форсунку центрального распылительного отверстия, направляющего струю топлива на штифт, установленный на днище поршня.

Формирующаяся при ударе струи о поверхность штифта зона топливовоздушной смеси с благоприятным для воспламенения составом охватывает при этом не только область свечи накаливания, но и центральный объем КС, пересекая таким образом струи топлива от боковых распыливающих отверстий форсунки. Очаг воспламенения от свечи на-

каливания на любой нагрузке быстро распространяется на весь объем КС. Эта особенность процесса сгорания способствует снижению выброса с ОГ  $\text{CH}_x$ . Расчеты характеристик тепловыделения показали, что в двигателе реализуется процесс сгорания, занимающий промежуточное положение между процессами в дизеле и ДВС с искровым зажиганием.

Три способа подачи метанола в дизель исследовались на модели Д-2156-МТН-8 румынского производства для грузового автомобиля. Метанол подавался путем карбюрирования его на впуске, в виде топливоспиртовой эмульсии и с помощью дополнительного насоса и форсунки. Отмечено, что использование метанола в качестве смесового топлива вызывает повышение содержания  $\text{CH}_x$  в ОГ при существенном снижении  $\text{NO}_x$  и сажи.

Японским автомобильным исследовательским институтом разработан шестицилиндровый дизель для автобусов объемом 5,8 л, в котором метанол впрыскивался в тороидальную КС в поршне или в диссоциированном виде подавался во впускной трубопровод через электромагнитный клапан и воспламенялся обычной свечой зажигания. Второй электромагнитный клапан регулировал подачу воздуха на впуске, и вся топливная система управлялась электронным блоком.

Фирма "Даймлер-Бенц" модернизировала дизель модели М407h с числом цилиндров 6, объемом 11,4 л для работы на парах метанола и принудительно воспламенении при степени сжатия 11,5. В процессе модернизации были заменены поршни, вместо системы впрыскивания ДТ установлена бесконтактная система зажигания, генератор паров метанола, газовый карбюратор-смеситель, система регулирования. Выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_x$  с ОГ при испытании по 13-ступенчатому ездовому циклу уменьшились на 25%, дымление отсутствовало, выбросы формальдегида уменьшились в 3,5...14 раз. На дизеле OM 407 проводились исследования по влиянию присадок на самовоспламеняемость метанола. В метанол добавлялось 4% триэтиленгликольдинитрата и 1% касторового масла. В качестве антиокислительной присадки добавлялось 0,02% морфолина. Были оптимизированы угол впрыскивания метанола, диаметр соплового отверстия штифтовой форсунки, внутренний диаметр топливопроводов. Показано, что рабочие показатели такого дизеля сопоставимы с прототипом и на 20...25% лучше дизеля, работающего на парах метанола. Выбросы  $\text{NO}_x$  на 50% меньше, чем при работе с ДТ. ОГ практически не содержат сажи, и применение каталитического нейтрализатора окислительного типа позволяет снизить выбросы CO до нуля, а  $\text{CH}_x$  — на 95%. Недостатком перевода является высокая стоимость метанола с присадками.

Данные по износу дизелей, работающих на метаноле, несколько противоречивы, однако по результатам стендовых испытаний, проводимых фирмой MAN в течение нескольких тысяч часов, вопросов, связанных с повышенным износом деталей дизеля или топливной аппаратуры, не возникает. Такие же результаты проводятся и в других аналогичных работах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л.: Недра, 1977. — 27 с.
2. Малов Р.В. Токсичность многокомпонентных газовых смесей. — М.: Гигиена и санитария, 1978. — № 5. — С. 114–115.
3. Кустов В.В., Тиунов А.А., Васильев Г.А. Комбинированное действие промышленных ядов. — М.: Медицина, 1975. — 255 с.
4. Тиунов Л.А., Кустов В.В. Токсикология окиси углерода. — М.: Медицина, 1980. — 288 с.
5. Смайлс В.И. Малотоксичные дизели. — Л.: Машиностроение, 1972. — 20 с.
6. Кузнецов И.Е., Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. — М.: Химия, 1979. — 340 с.
7. Фельдман Ю.Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. — М.: Медицина, 1975. — 159 с.
8. Никитин Д.П., Новиков Ю.В., Зарубин Г.П. Научно-технический прогресс, природа и человек. — М.: Наука, 1977. — 200 с.
9. Шабад Л.М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. — М.: Медицина, 1973. — 368 с.
10. Ахмеджанов М.А., Султанов А.С. Состав и температура воздуха в кабине трактора. — М.: Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1975. — № 12. — С. 42–43.
11. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. — М.: Мир, 1980. — 539 с.
12. Вредные вещества в промышленности / Справочник для химиков, инженеров и врачей. — Т. 2 / Под ред. Н.В. Лазарева. — М.: Химия, 1976. — 623 с.
13. Гигиеническая оценка акролеина как загрязнителя атмосферного воздуха. — М.: Гигиена и санитария, 1970. — № 3. — С. 6–8.
14. О канцерогенных свойствах выхлопной сажи автотранспорта / Б.П. Гуринов, В.Н. Тугаринова, О.И. Васильева и др. — М.: Гигиена и санитария, 1962. — № 12. — С. 19–24.
15. Мачульский Ф.Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи: Токсичность двигателей внутреннего сгорания и некоторые пути ее уменьшения. — М., 1966. — С. 206–219.
16. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1973. — 199 с.
17. Павлович Л.М. Камеры сгорания высокоэкономичных и малотоксичных дизелей. — М.: ЦНИИТЭИПтяжмаш, 1981. — 49 с.
18. Мочешников Н.А., Френкель А.И. Обобщенные зависимости влияния регулировок дизеля на его токсичность и экономические показатели. — М.: Автомобильная промышленность, 1974. — № 11. — С. 17–20.
19. Романов С.А. и др. Форсирование впрыскивания топлива — эффективный путь улучшения показателей экономичности и токсичности дизелей / Улучшение топливной экономичности, снижение дымности и токсичности отработавших газов автотракторных двигателей. — М.: ЦНИТА, 1985. — Вып. 85. — С. 5–11.
20. Сахаров А.Г. Дизельная и топливная аппаратура тракторов. — М.: Колос, 1977. — 200 с.



21. Сахаров А. Г. Начальная фаза окисления углеводородов при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП, 1965. — Вып. 2. — С. 5–28.
22. Сахаров А. Г., Бородай Г. Г., Шагавский В. И. Осциллографирование ионизационных токов в вихревой камере дизеля СМД-14. — М.: МИИСП, 1966. — Т. 3. — Вып. 2. — С. 63–69.
23. Сахаров А. Г. Ионизационные токи при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП, 1966. — Т. 3. — Вып. 2. — С. 71–83.
24. Багиров Д. Д., Златопольский А. В. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1974. — 216 с.
25. Сахаров А. Г. Исследование вихрекамерного дизеля СМД-14 на эксплуатационную надежность при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП, 1965. — Т. 2. — Вып. 2. — С. 29–43.
26. Лебедев О. Н. Методы улучшения смесеобразования в судовых четырехтактных дизелях. — Новосибирск, 1973. — 99 с.
27. Лерман Е. Ю., Гладков О. А. Высококонтрированные водотопливные эмульсии — эффективное средство улучшения экологических показателей легких быстроходных дизелей. — М.: Двигателестроение, 1986. — № 10. — С. 35–37.
28. Опыт снижения токсичности отработавших газов дизелей за счет подачи воды / А. К. Болотов, В. А. Лиханов, В. М. Попов, А. М. Сайкин. — М.: Двигателестроение, 1982. — № 7. — С. 48–50.
29. Симатов А. И. Каталитические нейтрализаторы Димитровградского завода. — М.: Автомобильная промышленность, 1985. — № 12. — С. 14–16.
30. Жегалин О. П. и др. Определение суммарного содержания альдегидов в отработавших газах автотракторных двигателей. — М.: ЦНИИЭИТракторосельхозмаш, 1976. — 40 с.
31. Влияние типа рабочего процесса и режимов работы быстроходных дизелей на свойства сажи и отработавшие газы / М. М. Вихерт, А. П. Кратко, И. С. Рафелькес и др. — М.: Автомобильная промышленность, 1975. — № 10. — С. 8–11.
32. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Роцин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. — Л.: Колос, 1980. — 168 с.
33. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. — М.: Высшая школа, 1978. — 319 с.
34. Методы планирования многофакторных экспериментов в дизелестроении / М. Н. Овсянников, В. А. Петухов, М. Ф. Усеня, И. Л. Шагалов. — М.: Двигателестроение, 1979. — № 9. — С. 5–7.
35. Гиршович В. Е., Френкель А. И. Опыт применения математической теории планирования эксперимента при снятии токсических характеристик дизелей. — М.: Тракторы и сельхозмашины, 1977. — № 3. — С. 12–14.
36. Звонов В. А., Фурса В. В. Применение метода математического планирования эксперимента для оценки токсичности двигателя // Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков, 1973. — Вып. 17. — С. 99–104.
37. Рафалес-Ламарка Э. Э., Звонов В. А., Фурса В. В. Математическое планирование экспериментального исследования двигателей внутреннего сгорания // Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков, 1972. — Вып. 16. — С. 29–34.
38. Мержиевский В. В. Влияние управления фазами топливоподачи на токсические показатели дизеля Д-37Е. — М.: Двигателестроение, 1979. — № 12. — С. 16–18.
39. Чемлева Т. А., Микешина Н. Г. Применение симплекс-решетчатого планирования при исследовании диаграмм состав — свойство // Новые идеи в планировании эксперимента. — М., 1969. — С. 191–209.
40. Пен Р. Э., Менчер Э. М. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве. — М.: Лесная промышленность, 1973. — 120 с.
41. Лиханов В. А., Попов В. М. Применение планирования эксперимента для исследования подачи метанола на впуске дизеля. — М.: Двигателестроение, 1986. — № 7. — С. 43–47.
42. Коллеров Л. К. Газовые двигатели поршневого типа. Л.: Машиностроение, 1968. — 247 с.
43. Генкин К. И. Газовые двигатели. — М.: Машиностроение, 1977. — 196 с.
44. Самоль Г. И., Гольдблат И. И. Газобаллонные автомобили. — М.: Mashgiz, 1963. — 458 с.
45. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский. — М.: Недра, 1986. — 255 с.
46. Скотт У. М. Новые виды топлива для автомобильных дизелей // Перспективные автомобильные топлива / Пер. с англ. — М., 1982. — С. 223–248.
47. Смаль Ф. В., Арсенов Е. Е. Перспективные топлива для автомобилей. — М.: Транспорт, 1979. — 151 с.
48. Обельницкий А. М. Топливо и смазочные материалы. — М.: Высшая школа, 1982. — 208 с.
49. Абрамов С. А., Гладких В. А., Попов В. П. О работах в ФРГ по применению метанола в качестве моторного топлива. — М.: Двигателестроение, 1983. — № 8. — С. 55–57.
50. Хачиян А. С. Применение спиртов в дизелях. — М.: Двигателестроение, 1984. — № 8. — С. 30–34.
51. Лиханов В. А., Попов В. М. Опыт подачи метанола на впуске дизеля. — М.: Двигателестроение, 1986. — № 4. — С. 47–50.
52. Совершенствование показателей дизелей изотермического подвижного состава / Ю. П. Алейников, Е. И. Боксенюк, Р. В. Малов, С. В. Никонов. — М.: Двигателестроение, 1984. — № 7. — С. 53–55.
53. Лиханов В. А., Попов В. М. Работа дизеля на метаноле с двойной системой топливоподачи. — М.: Двигателестроение, 1986. — № 8. — С. 47–50.
54. Vollmer H., Holtei H. Abgasuntersuchungen an Dieselmotoren aus dem Untertagebetrieb // Motortechh. Leitschrift. — 1980. — Bd 41. — H. 1. — S. 29–33.
55. Brickleyer V. A., Spindt R. S. Measurement of polynuclear aromatic hydrocarbons in diesel exhaust gases // SAE Techn. Paper Ser. — 1978. — Vol. 115. — N 780. — P. 8.
56. Springer K. J. Diesel Emissions, a worldwide concern // Toxicol. Eff. Diesel Engines. Proc. Environ Protect Agency 1981 Diesel Emiss.: Symp. (Raleigh, N. C., 5–7 Oct. 1981). — New York, 1982. — P. 3–14.
57. Evolution of an Emissions Control Strategy for Underground Diesel Mining Equipment / A. Stawsky, A. Lawson, H. Vergeer, F. A. Sharp // SAE Techn. Paper Ser. — 1984. — Vol. 176. — N 840. — P. 139–160.
58. Dafler H. Möglichkeiten zur Minderung von Immissions schaden in der Lungung — Forstwirtschaft // Proc. 3-d Int. Clean. Air Congr. — Dusseldorf, 1973.
59. Holdgate M. W. The Fate of Pollutants // Fuel and Environmental Congress Fastborne. — 1973. — Vol. 1.
60. Hardy H. L. et al. Lead as environmental poison // Clin. pharmacol. ther. — 1971. — N 6. — P. 982–985.
61. Tanlor G. W. Areview of automotive emission control programs. around the world // SAE Techn. Paper Ser. — 1978. — N 780950.
62. Unchara O. A. Diesel combustion temperature effect or soot // SAE Techn. Paper Ser. — 1980. — N 800969. — P. 30.
63. Pollution formation and destruction in flames. Vol. 1. Progress in Energy and Combustions Science / Edited by N. A. Ghigier, Vniv. of Sheffield (England). — Oxford: Pergamon Press Ltd, 1976. — 407 p.
64. Ysraël G. et al. Untersuchungen über die Partikelund PAH — Emission von Fahrzeug Dieselmotoren // MTZ. — 1982. — Bd 43. — H. 12. — S. 593–596.

65. Krempf P. et al. Dynamic Measurements of Particulate Mass Emission on Zight -Duty Diesel Engines under Steady State and Fransient Conditions// SAE Techn. Paper Ser. - 1985. - N 850269. - P. 11.

66. Bericht über den II Internationalen Kongress über Verbrennungskraft - maschinen in Barcelona Spanien, Teil 2 // MTZ. - 1975. - Bd 36. - H. 11. - S. 309-313.

67. Wilson R. P., Muir E. B., Pelliciotti F. A. Emission study of a single - cylinder diesel engine// SAE Automobile Engineering Congress, Paper 740123, Detroit, Michigan, February, 1974.

68. Presiher K. Verminderung der Rubemission directeinspritzender Farzeng - Dieselmotoren dural Kraftstoff - Handruc - Keinspritzung// 19 Intern. Fisita Congress "Energio Mobility". - Melburne (Hust - 1982. - Vol. 2. - P. 231-236. ralia).

69. Elsbett K., Elsbett L., Elsbett G., Behrens M. The Duotkermic Combustion for D. Y. Diesel Engine. SAE Techn. Paper Ser. - 1986. - N 860310. - P. 13-16.

70. Ford H. S., Merrion D. P., Hames R. Y. Reducing hydro-carbons and odor in diesel exhaust by fuel injector design: Preprints// SAE Techn. Paper Ser. - S. a. - N 700734. - P. 7., ill.

71. Elk's conversion of a 6 uglinder 11,6 I turbocharged intercooled truck engine for experimental purpose/ M. Behrens, L. Elsbett, G. Elsbett, K. Elsbett// SAE Techn. Paper Ser. - 1985. - N 850551. - P. 27-31.

72. Kohtam Kanno and s. a. Effects of EGR in a Swirl Chamber Type Diesel Engine// I Mech. Eng. Lab. - 7914. - Vol. 28. - N 4. - P. 105-120.

73. Neitz A. Chmela F. Eignung von M.A.N. - FM - Dieselmotoren für den Betrieb min rienen Alkoholkraftstoffen// MTZ. - 1981. - Bd 42. - H. 12. - S 495-499.

74. Extended performance of alcoholfumigation in diesel engines through different multipoint alcohol injection timing cycles (D. Savagel, R. A. White, S. Cole, G. Pritscheff// SAE Techn. Paper Ser. - 1986. - N 861580. - P. 11.

## CONTENTS

|   |            |
|---|------------|
| Preface . . . . .   | 4          |
| <b>1. Prospects of National auto-tractor diesel engine production . . . . .</b>                                     | <b>6</b>   |
| <b>2. Estimation of exhaust toxicity . . . . .</b>  | <b>8</b>   |
| 2.1. Exhaust sources . . . . .  | 8          |
| 2.2. Composition of exhaust gases . . . . .   | 9          |
| 2.3. Main components of exhaust gases and their toxicity. . . . .   | 19         |
| <b>3. Rate setting of toxicity. . . . .</b>   | <b>24</b>  |
| 3.1. Assesment of atmospheric pollution by exhaust gases . . . . .  | 24         |
| 3.2. National and industries' norms and standards . . . . .   | 31         |
| <b>4. Formation of toxic components. . . . .</b>  | <b>34</b>  |
| <b>5. Impact of various factors on toxicity and smoke intensity . . . . .</b>                                       | <b>46</b>  |
| 5.1. Operational and desing factors. . . . .  | 46         |
| 5.2. Parameters and adjustment of fuel equipment . . . . .  | 58         |
| 5.3. Fuels and oils. . . . .  | 67         |
| <b>6. Decreasing of toxicity and smoke intensity. . . . .</b>   | <b>73</b>  |
| 6.1. Low-toxic working process. . . . .   | 73         |
| 6.2. Fuel feeding for inlet . . . . .   | 85         |
| 6.3. Water feeding into cylinders . . . . .   | 93         |
| <b>7. Classification of systems for decreasing toxicity and smoke intensity. Major requirement to them. . . . .</b> | <b>107</b> |
| 7.1. Theoretical base . . . . .   | 107        |
| 7.2. Classification of systems for decreasing diesel toxicity . . . . .   | 112        |
| 7.3. Major requirements for toxicity decrease systems . . . . .   | 116        |
| <b>8. Design features and principal parameters of toxicity decrease systems . . . . .</b>                           | <b>117</b> |
| <b>9. Toxicity and smoke test of diesel engines. . . . .</b>  | <b>143</b> |
| 9.1. Methods and instruments for gas analysis. . . . .  | 143        |
| 9.2. Application of experiment design theory. . . . .   | 151        |
| <b>10. Use of alternative fuels for decreasing toxicity of auto-tractor diesel engines . . .</b>                    | <b>171</b> |
| Literature . . . . .  | 205        |