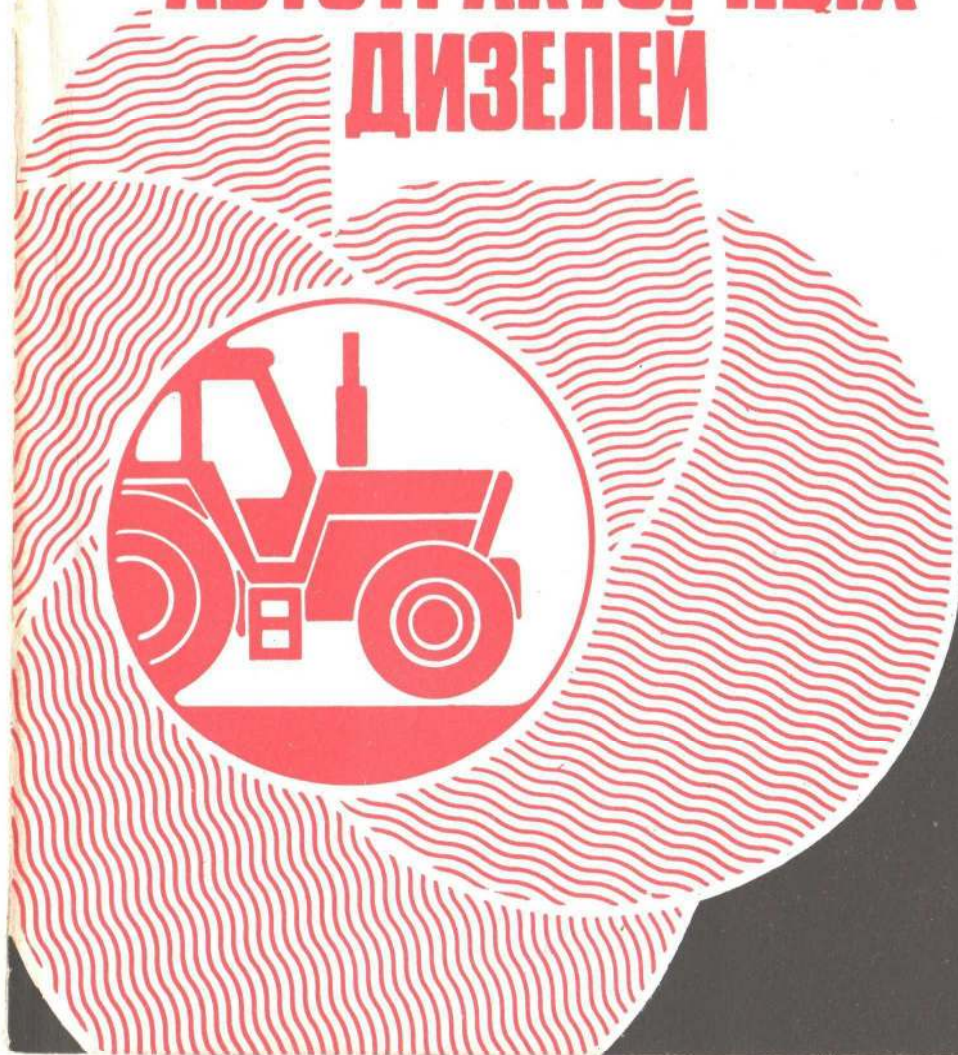


 **СНИЖЕНИЕ
ТОКСИЧНОСТИ
АВТОТРАКТОРНЫХ
ДИЗЕЛЕЙ**



**В.А. ЛИХАНОВ
А.М. САЙКИН**

**СНИЖЕНИЕ
ТОКСИЧНОСТИ
АВТОТРАКТОРНЫХ
ДИЗЕЛЕЙ**



СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**В.А. ЛИХАНОВ
А.М. САЙКИН**

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

2-е издание, исправленное и дополненное



МОСКВА «КОЛОС» 1994

Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Колос, 1994. — 224 с.: ил.
ISBN 5—10—003222—7.

Рассказано о токсичности отработавших газов дизелей, устанавливаемых на тракторы, автомобили и 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 дизелей.

Таблиц — 34. Иллюстраций — 91. Библиография — 74 названия.

Considered are the problems of toxicity and environmental impact of exhaust gases from diesel engines of tractors, trucks and 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 diesel engines.

Л $\frac{3703030000-106}{035(01)-94}$ Заказная

Научное издание

ЛИХАНОВ ВИТАЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, САЙКИН АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

Снижение токсичности автотракторных дизелей

Художник Л. Ч. Гоцлавский
Художественный редактор Н. А. Никонова
Технический редактор В. А. Маланичева
Корректор Г. В. Абатурова

ИБ № 8232

Лицензия № 010159 от 04.01.92

Сдано в набор 22.07.94. Подписано в печать 02.11.94. Формат 60×88¹/₁₆. Бумага кн.-журн. Гарнитурa Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,72. Усл. кр.-отг. 13,96. Уч.-изд. л. 14,97. Изд. № 115. Тираж 1050 экз. Заказ № 1988 "С" № 106.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 107807, ГСП-6, Москва, Б-78, ул. Садово-Спаская, 18.

Московская типография № 9 Комитета РФ по печати, 109033, Москва, Волочаевская, 40.

ISBN 5—10—003222—7

© В. А. Лиханов, А. М. Сайкин, 1991
© В. А. Лиханов, А. М. Сайкин, 1994,
с изменениями

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

а.с. — авторское свидетельство
в.м.т. — 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
МТЭ — метано-топливная эмульсия
НИР — научно-исследовательская работа
н.м.т. — нижняя мертвая точка
ОГ — отработавшие газы
ПАВ — поверхностно-активные вещества
ПАУ — полициклические ароматические углеводороды
ПДК — предельно допустимая концентрация
РФС — расширенный фракционный состав
СПГ — сжатый природный газ
ССТ — система снижения токсичности
ТНВД — топливный насос высокого давления
ЦПГ — цилиндропоршневая группа

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для выполнения задач по 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 оксиды азота (NO_x) и углерода (CO), сажа (C), углеводороды (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, освоенные в серийном производстве, а также перспективные, по которым ведется интенсивный поиск.

Исследование обширного фактического материала и приводи-

мых 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 Л. И. Варшавского и И. Б. Гурвича за ценные замечания и советы, сделанные при подготовке рукописи, а также специалистов А. И. Френкеля, А. В. Сагалович, О. А. Саржинова, В. М. Попова, С. А. Плотникова и др., участвовавших в проведении ряда работ и обсуждении материала книги.

1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЯ

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.

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
С турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха	37...39	205...225	То же
Усовершенствованный	40...43	190...200	»
Теплоизолированный	43...46	180...190	»
Турбокомпаундный с силовой турбиной	48...52	165...175	1989...1995
С пониженным трением	52...56	150...165	1992...1996
С утилизацией теплоты в цикле Ренкина	До 60	140...150	К 2000

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 (NO_x , CO , CH_x), а также на дымность ОГ удельный выброс токсичных веществ с ОГ дизелей был высок и достигал по оксидам азота 30,0...35,0 г/(кВт·ч), по оксидам углерода — 10,0...12,0, 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 организационных мероприятий, позволяющий в среднем в 1,5 раза уменьшить токсичность и дымность ОГ дизелей, а их малотоксичные модификации в 2...3 раза.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, наиболее эффективны и экономичны сочетания мероприятий по разработке

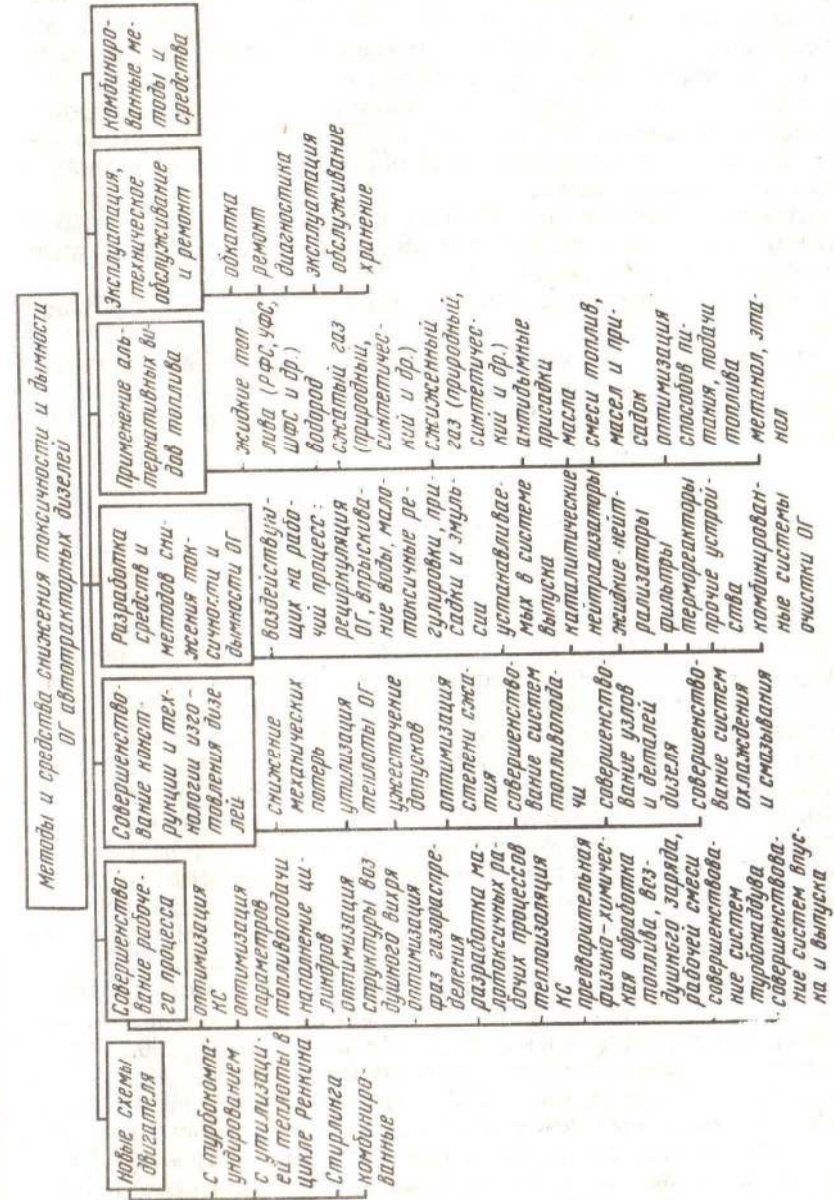


Рис. 1. Схема основных направлений и мероприятий по снижению токсичности и дымности ОГ автотракторных дизелей

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 деятельностью) и естественных (космических и геологических процессах, продуктах жизнедеятельности живых организмов) источниках. По оценкам специалистов США, Японии, Германии и Швеции, транспортные и стационарные источники выбрасывают примерно равные количества токсичных веществ по массе. В странах СНГ примерно 70 % токсичных веществ падает на стационарные источники и лишь 30 % — на транспортные. Естественные источники выбрасывают в атмосферный воздух до 90,5 % CO и CO₂, до 74,3 % CH_x, 85 % твердых частиц [1, 54].

Почти все средства современного транспорта загрязняют атмосферу, однако большая часть из них падает на автомобили. Тысяча автомобилей в среднем дают 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. В странах СНГ в сельском хозяйстве используется более 2,5 млн тракторов, а парк зерноуборочных комбайнов составляет около 800 тыс. Мощность

тракторных, комбайновых и автомобильных двигателей, используемых в сельском хозяйстве, составляет 386 млн кВт (525 млн л.с.).

Автотракторные ДВС загрязняют атмосферу вредными веществами, выбрасываемыми с ОГ, картерными газами и топливными испарениями.

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

Второй источник загрязнений — картерные газы, которые образуются при смешивании части свежего заряда и ОГ, прорвавшихся через неплотности цилиндропоршневой группы из КС 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 основные токсичные компоненты — это NO_x (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 двигателя выше, чем от дизеля, и составляют от 4 до 12 % выбросов CH_x.

2.2. Состав отработавших газов

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

2. СРЕДНИЙ СОСТАВ ОГ ДВС

Компонент	Концентрация в ОГ, %		Примечание
	Бензиновый двигатель	Дизель	
Азот	74...77	74...78	Нетоксичный
Кислород	0,3...8,0	2,0...18	То же
Водяной пар	3,0...5,5	0,5...9,0	»
CO ₂	5,0...12,0	1,0...12,0	Малотоксичный
CO	0,5...12,0	0,005...0,4	Токсичный
NO _x	0,01...0,8	0,004...0,5	То же
CH _x	0,2...3,0	0,009...0,3	»
RCHO (альдегиды)	0...0,2	0,001...0,009	»
C (сажа), г/м ³	0...0,04	0,01...1,1	»
Бенз(а)пирен, мкг/м ³	0,0...20,0	0,0...1,0	»

В общем случае содержание газообразных продуктов неполного сгорания топлива в ОГ (CO, CH_x, RCHO) бензинового двигателя выше, чем в ОГ дизеля, содержание NO_x у этих двигателей мало отличается, а дымность ОГ (сажесодержание) у дизеля гораздо выше. Можно отметить две тенденции при изучении состава ОГ: определение группового состава и индивидуальных веществ. Рабо-

ты первого направления позволяют подготовить и обосновать данные для нормирования и контроля содержания групп веществ при применении устройств, понижающих их количество в ОГ дизелей.

Цель работ второго направления — 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 ГОСТ 12.1.007—76).

По своей природе ОГ 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 (CO₂ и H₂O) 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_x, а также продукты неполного сгорания топлива (несгоревшие углеводороды, оксид 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 ОГ 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, SO₃ с образованием тумана серной кислоты).

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

3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ОГ ДИЗЕЛЕЙ

(о — общее токсическое действие; г — поражение зрительного нерва и сетчатки глаза, помутнение хрусталика, ожоги роговицы; к — канцерогенность; кт — дым, действующее на кровотоки; кя — кровавые яды, вызывающие изменения состава крови; н — наркотизм; нс — поражение нервной системы; ня — нервные яды, вызывающие судороги и параличи; п — поражение печени; по — поражение почек; пг — поражение пищеварительного тракта; рс — раздражение слизистых оболочек глаза и дыхательных путей; с — участие в образовании смога; се — поражение сосудистой системы; у — ухудшающее действие)

Название (или класс) вещества	Содержание, %	Качественная характеристика токсичности	Порог воздействия запаха, мг/л	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	
					р.з.	м.р.
Азот	74,0...78,0	—	—	—	—	—
Кислород	2,0...18,0	—	—	—	—	—
Диоксид углерода	1,0...12,0	н, рс, у, сс	—	—	—	—
Вода	0,5...9,0	—	—	—	—	—
Оксид углерода	0,005...0,4	кя, нс	—	4	3,0	1,0
Оксиды азота в пересчете на NO ₂	0,004...0,5	—	0,0002...0,008	2	0,085	0,085
NO	0,004...0,5	кя, нс, п, кт	—	—	—	—
NO ₂	0,00013...0,013	рс, о, п	—	—	—	—
Оксиды серы	0,005...0,05	—	—	—	—	—
SO ₂	0,0018...0,02*	рс, кя, кт, п, г	0,00087...0,003	3	0,5	0,05
SO ₃	2...3 % от содержания SO ₂	рс, сс, нс	—	2	—	—
Углеводороды в пересчете: на С	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
на C ₃ H ₈	0,00023...0,017*	—	—	—	—	—
Альдегиды в пересчете на C ₂ H ₄ O	1,0...10,0 мг/м ³	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 ³	к	—	1	0,00015	1 · 10 ⁻⁶
Сажа	0,28...0,63*** мкг/м ³	к, пт	—	1	0,00015	1 · 10 ⁻⁶
	0,01...1,10 г/м ³	—	—	3	4****	0,15
						1,0...25
						0,01...5,0
						0,003
						0,03
						1 · 10 ⁻⁶
						1 · 10 ⁻⁶
						0,05

* По [54].

** По [1] для любых продуктов сгорания.

*** По [55].

**** Значение ПДК_{ср} для сажи относится к сажам черным промышленным с содержанием бенз(а)пирена не более 35 мг на 1 кг.

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 — $(2,9...7,9) \cdot 10^{-6} \%$; этилен — $(0,4...4,0) \cdot 10^{-6} \%$; ацетилен — до $1,2 \cdot 10^{-6} \%$; пропилен — до $1,3 \cdot 10^{-6} \%$. Известны данные по определению в ОГ четырех дизелей групп углеводородов (в мол. %): $C_{12} - 3,4...3,8$; $C_{12}-C_{13} - 14,0...14,2$; $C_{14}-C_{15} - 36,5...37,2$; $C_{16}-C_{17} - 6,3...37,2$; $C_{18}-C_{19} - 6,6...17$; $C_{20} - 1,1...1,8$.

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 углеводороды), 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, представленные в таблице 3, даны на основании [2, 3, 4, 55, 56, 57]; для классов углеводородов и 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 (ПДК), 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, 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 органо-

лептическим 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 реальных условиях производства и применения.

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

По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяют на четыре класса опасности: 1-й — чрезвычайно опасные; 2-й — высокоопасные; 3-й — умеренно опасные; 4-й — 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: оксиды азота, SO_3 (аэрозоль H_2SO_4), бензол, фенантрен, фенол, β -нафтол, формальдегид, акролеин, муравьиная кислота, фуран. К третьему классу опасности принадлежат 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 ($ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$) не должна превышать единицы, т. е.

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leq 1. \quad (1)$$

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;

*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.

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.

Существует 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 $C_n/ПДК_n$ называют *относительной концентрацией*). Это выражение дает условие безвредности смеси веществ одностороннего действия. Сумму относительных концентраций веществ в данном случае следует использовать для расчета минимального количества свежего воздуха, потребного для разбавления смеси до безвредного состояния: например, если сумма равна 3, смесь нужно разбавить минимум втрое, т. е. добавить к ее объему два объема свежего воздуха; эту же сумму следует принять и за критерий токсичности смеси. Этот критерий в соответствии с данным выше определением — количественный, поскольку он позволяет вычислить, во сколько раз смесь веществ токсичнее предельно допустимого значения, т. е. единицы, и поэтому показывает, во сколько раз смесь веществ данного состава токсичнее смеси веществ другого состава.

При отсутствии одностороннего действия условие безвредности смеси веществ заключается в том, чтобы не сумма относительных концентраций, а относительная концентрация каждого вещества отдельно не превышала единицы, т. е. $C_n/ПДК_n \leq 1$. 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 этого количества 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 явно 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 одностороннего 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

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

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

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

Показатель μ является количественным критерием токсичности газовой смеси только в том случае, когда компоненты действуют на организм односторонне. При отсутствии такого действия условие безвредности $\mu \leq 0$ вместо условия $C_i/ПДК_i \leq 1$ 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- и 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 раз-

дражающее действие кислотообразующих неорганических газов (NO_2 , SO_2 , 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: CO , NO , 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: CO_2 и 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_x в присутствии CO возрастает в 3, а токсичность CO в смеси с NO_x — в 1,5 раза. Для этого случая вместо формулы (1) предложено выражение

$$\frac{C_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{CO}} : 1,5} + \frac{C_{\text{NO}_x}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_x} : 3} \leq 1, \quad (4)$$

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 однонаправленно, а два вещества обладают сложным действием.

Основные нормируемые в ОГ дизелей компоненты: CO , NO_x 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_x 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:

$$AQI = \frac{C_{\text{CO}}}{\tau_{\text{CO}}} + \frac{C_{\text{NO}}}{\tau_{\text{NO}}} + \frac{C_{\text{RCD}}}{\tau_{\text{RCD}}} + 1,5 \left[\frac{C_{\text{SO}_2}}{\tau_{\text{SO}_2}} + \frac{C_{\text{RCD}}}{\tau_{\text{RCD}}} \right] + 1,2 \left[\frac{C_{\text{NO}_2}}{\tau_{\text{NO}_2}} + \frac{C_{\text{RCD}}}{\tau_{\text{RCD}}} \right], \quad (5)$$

где τ_{vi} — пороговое предельное значение i -го компонента ОГ; RCD — вдыхаемая горючая 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_x и CO с учетом потенцирования по формуле (4). При низких концентрациях CO это количество будет практически равно рассчитанному по относительной концентрации NO_x .

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 ($\text{м}^3/\text{ч}$),

$$Q_i = \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} Q_{\text{ог}}. \quad (6)$$

Суммарный нормообъем для газовой среды, содержащей несколько компонентов,

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} Q_{\text{ог}}. \quad (7)$$

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

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ог}} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}. \quad (8)$$

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, — одна 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, оксид углерода, углеводороды, бенз(а)пирен, оксиды серы, аммиак, диоксид 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].

Серьезная проблема — 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 в животноводческих комплексах, парниках, хранилищах и других местах 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 воздуха в кабинах зерноуборочных комбайнов токсичными компонентами ОГ приводит к ухудшению условий труда комбайнеров, в результате чего производительность их труда может упасть от 10 до 40 %.

Оксиды азота. Известно около 10 различных по составу оксидов азота. Из всего количества оксидов азота, содержащихся в ОГ дизеля, 95...98 % приходится на долю NO и 2...5 % на NO₂. Содержание других оксидов азота в ОГ ничтожно. В атмосфере при нормальных условиях NO (бесцветный газ, очень плохо растворяется в воде) окисляется до NO₂ (газ красновато-бурого цвета с характерным запахом, тяжелее воздуха, слабо растворимый в воде, плотность по воздуху 1,58) и N₂O₄.

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_x в воздухе 10⁻⁵ % — абсолютный порог воздействия; 0,0001...0,0003 % — порог восприятия запаха; 0,0013 % — порог раздражения слизистых оболочек носа и глаз; 0,001...0,002 % — образование метагемоглобина; 0,004...0,008 % — отек легких.

Оксиды азота, в первую очередь NO₂, вызывают необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе. В соединении с углеводородами они образуют токсичные нитроолефины. Воздействие NO_x 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_x снижают прозрачность атмосферы и участвуют в образовании фотохимического тумана — смога, состоящего из фотохимических оксидантов и озона [11].

Ни NO, ни NO₂ непосредственно на металлы не воздействуют. Но NO₂ реагирует с атмосферной влагой и образует азотную кислоту, которая вызывает коррозию металлов.

Оксид углерода. CO — бесцветный газ без запаха и вкуса; очень плохо растворим в воде; плотность по воздуху 0,97; горюч; с воздухом образует взрывчатые смеси, с металлами, щелочами и водой не реагирует.

Токсическое действие CO на организм человека заключается в вытеснении кислорода из оксигемоглобина крови и образовании карбоксилемоглобина. Это приводит к падению способности крови переносить достаточно кислорода из легких к тканям. Из-за пониженного содержания O₂ 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 воздействии CO притупляется сознание, развивается состояние слабости и безучастности, равнодушия, затем нарастает сонливость, оцепенение и теряется сознание.

В производственных условиях при отравлении 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 его 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 после нескольких вдохов.

Особое внимание надо обращать на наиболее распространенный тип хронического отравления небольшими дозами СО 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 том числе 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 свойствами, 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 концентрации 60 мг/м^3 не оказывает заметного воздействия на организм человека. Так же малотоксичны 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 снижению активности ферментов, вызывает изменение функционального состояния центральной нервной системы, понижает давление.

В состав смога входят фотооксиданты, в том числе 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°C , кипения — около 310°C , возгоняется при 70°C . Молекулярный вес 252,3; молекула состоит из пяти колец; плохо растворяется в воде.

Проблема предотвращения загрязнения окружающей среды канцерогенными ПАУ выходит за рамки крупных промышленных городов. Повышенное содержание бенз(а)пирена наблюдается повсеместно, причем отмечено сезонное колебание концентрации бенз(а)пирена в почве. Так, при изучении динамики изменения содержания бенз(а)пирена на контрольных полях Павлодарской и Ферганской областей содержание бенз(а)пирена в почве на глубине до 10 см в течение летнего периода увеличилось на 2,2...3,5 мкг/кг (исследования Ю. Л. Когана). Опасность подобно-

го загрязнения заключается в возможности перехода бенз(а)пирена 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 воздействием на центральную нервную систему (поражает внутренние органы, инактивирует некоторые ферменты)[12].

Акролеин. 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; $1,6 \cdot 10^{-3} \%$ — 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 задерживаются в легких 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 SO_2 наблюдается раздражающее действие на верхние дыхательные пути. Другие стороны воздействия SO_2 на организм человека: нарушаются 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 NO_x , не приводящая к поражению листьев этих растений в течение 0,5 ч, — $0,8 \text{ мг/м}^3$ [1]. Кроме того, наличие NO_2 в атмосфере приводит к протеканию фотохимических реакций и образованию в качестве вторичных продуктов озона (O_3) и пероксиацетилнитрата, вредное действие которых на листья растений проявляется при более низких концентрациях NO_2 , чем исходная.

Концентрация NO_2 в воздухе 4...6 мкг/м³ приводит к серьезному повреждению растений, при концентрации до 2 мг/м^3 и дли-

тельном воздействии происходит хлороз растений. Низкие концентрации NO_2 в воздухе вызывают снижение роста.

Растения очень чувствительны к загрязнению воздуха диоксидом серы, разрушающим хлорофилл. Лиственные растения, ежегодно сбрасывающие листву, легче переносят загрязнение атмосферы диоксидом серы, а хвойные — более болезненно реагируют на SO_2 . При концентрации SO_2 в воздухе $0,015 \dots 0,035 \text{ мг/м}^3$ прирост древесной массы хвойных деревьев составляет примерно 20 % из-за снижения интенсивности фотосинтеза без изменения интенсивности дыхания хвои. При концентрации SO_2 от $0,23$ до $0,32 \text{ мг/м}^3$ нарушение фотосинтеза и дыхания хвои вызывает усыхание сосны за 2...3 года. Концентрация SO_2 в летнее время $0,08 \dots 0,1 \text{ мг/м}^3$ и в зимнее время $0,2 \text{ мг/м}^3$ приводит к постепенной гибели большинства растений.

Загрязнение атмосферы ОГ приводит к накоплению в сельскохозяйственных культурах канцерогенного бенз(а)пирена. Наибольшее его количество найдено в пробах кочанной капусты ($15,6 \dots 24,5 \text{ мкг/кг}$), наименьшее — в пробах помидоров ($0,22 \text{ мкг/кг}$). В хлебном зерне бенз(а)пирен содержится в количестве от $0,68$ до $1,44 \text{ мкг/кг}$ [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 оработавшими 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	—	$2 \cdot 10^8$
Соединения 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	$1,42 \cdot 10^8$	$1,03 \cdot 10^8$
Диоксид 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 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

Источник загрязнения	Доля в загрязнении атмосферы (%) в странах		
	США	Англия	Франция (по 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 странах СНГ, 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 странах СНГ нормы для атмосферного воздуха установлены ниже защитно-приспособительных реакций. В этом заключается отличие в подходе к нормированию по отношению к другим странам, в которых под критерием вредности загрязнения атмосферы понимается заболеваемость человека.

Предельно допустимые концентрации. Нормативом качества воздуха в странах СНГ является ПДК индивидуальных веществ.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) — концентрация, которая при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч (или при другой продолжительности, но не более 40 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 максимальной разовой ПДК вредных веществ в атмосфере (ПДК_{м.р}) и среднесуточной (ПДК_{с.с}), то пока в странах СНГ 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_{м.р} — 20...30 мин, для ПДК_{с.с} — 24 ч.

В странах СНГ утверждены атмосферные ПДК на 140 вредных веществ. В таблице 6 представлены значения ПДК токсичных компонентов в воздухе населенных пунктов и рабочей зоны согласно нормам (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.

6. НОРМЫ ПДК ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ, МГ/М³

Зона	Оксиды азота			Сажа	СО
	NO _x	NO ₂	NO		
На рабочем месте (ПДК _{р.з})	5	9	30	3,5	20
В атмосфере населенных мест:					
среднесуточная (ПДК _{с.с})	—	0,085	—	0,05	1
максимальная (ПДК _{м.р})	—	0,085	—	0,15	3

Продолжение

Зона	Бенз(а)пирен	СН _x	Альдегиды	
			акролеин	формальдегид
На рабочем месте (ПДК _{р.з})	0,00015	30	0,70	0,5
В атмосфере населенных мест:				
среднесуточная (ПДК _{с.с})	0,001	—	0,03	0,012
максимальная (ПДК _{м.р})	—	—	0,03	0,035

Загазованность и запыленность воздуха на рабочих местах — одни из наиболее распространенных видов вредностей как при полевых механизированных работах, так и выполнении работ в стационарных условиях (в комбикормовых цехах, животноводческих фермах, складах, теплицах и на других производственных участках).

Установлено дополнительное требование об обязательном суммировании воздействия оксидов серы и азота, которое выражается условием

$$\frac{C_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}} + \frac{C_{\text{NO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} \leq 1, \quad (9)$$

что ужесточает требования, предъявляемые к ДВС 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: метод CVS — C/H (США); метод 10/11 (Япония); метод ЕЭК ООН (страны ЕЭС).

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

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 _x	NO _x	СО	СН _x	NO _x
1968	32	3,7	3,1	50	50	Не регламентиров.
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)

Продолжение

Год	Предельная норма выбросов, г/км					
	Федеральный стандарт (FTP)			Калифорнийский стандарт		
	CO	CH _x	NO _x	CO	CH _x	NO _x
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.

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

8. НОРМЫ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОГ НА 1985 Г.

Страна	Метод контроля	Содержание вредных веществ, г/км		
		CO	CH _x	NO _x
США	75FTP	2,1	0,255	0,62
Япония	10/11	2,12	0,26	0,25
Австралия	75FTP	9,3	0,93	1,9
Канада	75FTP	15,5	1,2	1,9
Швеция	75FTP	24	2,1	1,9
Швейцария	72FTP	9,3	0,93	1,2
Страны ЕЭС (в зависимости от массы автомобиля)	ECE-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 прямое сравнение результатов испытаний затруднено. Ниже представлены ориентировочные зависимости перерасчета результатов испытаний транспортных средств по методикам ЕЭК ООН и CVS—C/H [61]: CO CVS—C/H (г/км) = 2,06 + 0,26 · ЕЭК ООН; CH_x CVS—C/H (г/км) = 0,15 + 0,52 · ЕЭК ООН; NO_x CVS—C/H (г/км) = 0,71 + 0,12 · ЕЭК ООН.

Для определения токсичности ОГ дизелей в странах СНГ, США, Японии и в других промышленно развитых странах разработаны специальные испытательные циклы. В США и европейских странах, входящих в ЕЭК ООН (в том числе и странах СНГ, принимающих участие в работе Комитета по внутреннему транспорту ЕЭК ООН по вопросам загрязнения воздуха автотранспортом), сформировали 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_x и NO_x) проводят 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.

9. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ 13-СТУПЕНЧАТЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ (США)

Номер ступени	Режим работы дизеля		Продолжительность режима, мин				Коэффициент приведения (K)
	Частота вращения коленчатого вала	Нагрузка (±2 %)	Время на смену режима	Время на организацию режима	Время на контроль состава ОГ	Общее время	
1	n _{х.х.} min	0	1	8	1	10	—
2	Для ступеней 2...6 — соответствующая максимальной крутящему моменту*	2	1	8	1	10	0,08
3		25	1	8	1	10	0,08
4		50	1	8	1	10	0,08
5		75	1	8	1	10	0,08
6		100	1	8	1	10	0,08
7		n _{х.х.} min	0	1	8	1	10
8	Для ступеней 8...12 — соответствующая номинальной мощности	100	1	8	1	10	0,08
9		75	1	8	1	10	0,08
10		50	1	8	1	10	0,08
11		25	1	8	1	10	0,08
12		2	1	8	1	10	0,08
13		n _{х.х.} min	0	1	8	1	10

*Частоту вращения коленчатого вала на режимах по пп. 2...6 выбирают в диапазоне 60...75 % от n_{ном.}

Время работы на каждом режиме составляет 10 мин. Расчет выброса CO, CH_x и NO_x ведут 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 эффективную мощность на режимах испытаний (данный расчет ведут с учетом коэффициентов приведения, отображающих услов-

но долю каждого режима в условиях реальной работы транспортного средства);

полученные значения вредных выбросов (M_{CO, CH_x, NO_x}) 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:

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

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

Коэффициенты приведения стандартов США, ЕЭК ООН и других стран даны 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 предъявляют 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 КН или фильтров при одновременном использовании систем автоматической электронно-управляемой топливоподачи и, возможно, использование метанола и СПГ 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 токсичности и дымности ОГ.

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

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

10. НОРМЫ НА ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ДЫМНОСТИ ОГ ДИЗЕЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ СТРАНАХ

Нормированный параметр	США [г/(кгВг · ч)]					Япония* (% · 10 ⁻⁶)				Страны ЕЭК ООН [г/(кгВг · ч)] с 1982 г.	
	с 1978 г.	с 1986 г.	с 1988 г.	с 1991 г.		с 1979 г.	Проект				
	Дизели грузовых автомобилей массой более 2,5 т	Дизели грузовых автомобилей массой более 3,8 т	Дизели тяжелых грузовых автомобилей	Дизели городских автобусов	Дизели тяжелых грузовых автомобилей	Дизели автомобилей большой грузоподъемности и строительных машин (массой более 25 т) с камерой сгорания	неразделенной	разделенной	разделенной		
NO _x	17,5	14,5	8,0	6,7	6,7	6,7	700/540	450/340	—/470	—/290	18,0
CO	25,0	21,1	20,8	20,8	15,5	20,8	980/790	980/790	980/790	980/790	14,0
CH _x	1,0	1,8	1,7	1,7	0,96	1,7	670/510	670/510	670/510	670/510	3,5
Дымность ОГ	Максимальное значение — 50 %	При разгоне — 20 %, торможении — 15 %, максимальное значение — 50 %	—	—	—	—	Максимальное значение — 50 %				—
Частота	—	—	0,8	0,33	0,13	0,13	—	—	—	—	0,36 (с 1994 г.)

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

3.2. Государственные и отраслевые нормы и стандарты

Снижение токсичности и дымности ОГ — часть работ, проводимых странами СНГ 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, 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 %, свободного ускорения без нагрузки для 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 том числе иностранные), находящиеся в эксплуатации на автомобильных дорогах, и устанавливает допустимую норму дымности ОГ (оптической плотности ОГ) на режимах максимальной частоты вращения коленчатого вала на холостом ходу — 15 %; 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: СО — 9,5 г/(кВт·ч), СН_x — 3,4 и NO_x — 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, распространяющимся 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 СО — 10,0 г/(кВт·ч), СН_x — 4,0, NO_x — 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 СО — 4,0 г/(кВт·ч), СН_x — 3,0 и NO_x — 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.

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_{\max}^{**} кр	0	$n_{x.x. \min}$	0	0,067
2	Промежуточный режим	10	0,08	n_{\max}^{**} кр	27,5	n_{\max}^{**} кр	10,0	0,08
3	То же	25	0,08	n_{\max}^{**} кр	55	n_{\max}^{**} кр	27,5	0,08
4	»	50	0,08	n_{\max}^{**} кр	82,5	n_{\max}^{**} кр	55,0	0,08
5	»	75	0,08	n_{\max}^{**} кр	110	n_{\max}^{**} кр	82,5	0,08
6	»	100	0,25	Номинальный режим	0	n_{\max}^{**} кр	110,0	0,08
7	Холостой ход	—	0,25/3	То же	25	$n_{x.x. \min}$	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_{\max}^{} кр или $0,6n_{\text{ном}}$.

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 $n_{ном}$ до большей из величин $0,6n_{ном}$ или n_{max} 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, распространяющимся 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, CH_x — 4,0, NO_x — 25,0, для дизелей, применяемых в местах с ограниченным воздухообменом, по CO — 4,0 (с нейтрализатором, установленным в выпускной системе дизеля), CH_x — 2,0, NO_x — 13,0 г/(кВт·ч).

Измерение выбросов нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей по ОСТ 23.1.440—76 и 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.

12. НОРМЫ ДЫМНОСТИ ОГ ТРАКТОРНЫХ И КОМБАЙНОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Объемный расход воздуха, поступающего в цилиндры дизеля на заданном режиме, м ³ /с	Нормы дымности	
	Натуральный показатель ослабления по основной шкале дымомера (K), м	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

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

Дымность ОГ дизелей, предназначенных для установки на тракторах, используемых в местах с ограниченным воздухообменом, измеряют на установившемся режиме работы дизеля при шести значениях частоты вращения через равные интервалы от $n_{ном}$ до большего из значений $0,55n_{ном}$ или n_{max} кр и максимальных значениях крутящего момента для каждой частоты вращения.

Перечисленными выше 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 для дизелей, применяемых в горной промышленности, ограничивают уровень выбросов CO и NO_x с ОГ. 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_x (в пересчете на NO_2) — 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.

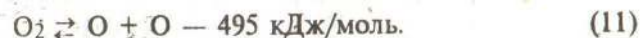
Существенное влияние на содержание вредных веществ в ОГ дизеля оказывают конструктивные и рабочие параметры. В таблице 13 представлены оценочные удельные выбросы ряда дизелей при их испытании по 13-ступенчатому циклу [61].

13. ОЦЕНОЧНЫЕ УДЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ ДИЗЕЛЕЙ
(ПРИ ИСПЫТАНИИ ПО 13-СТУПЕНЧАТОМУ ЦИКЛУ)

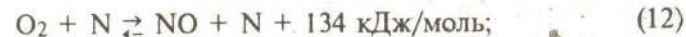
Эффективная мощность, кВт	Значение оценочных удельных выбросов, г/(кВт · ч)					
	CO	NO _x	CH _x	RCHO	Частицы	Запах
Четырехтактный двигатель с непосредственным впрыскиванием без наддува						
25,3	13,6	11,8	2,6	0,7	0,8	6,1
39,4	5,7	9,1	4,2	0,55	0,8	4,9
42,0	7,9	26,6	4,1	0,55	0,14	5,4
42,7	6,7	22,7	4,2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

Из приведенных в таблице 13 данных следует, что в ОГ дизелей наибольшее количество удельных выбросов приходится на долю NO_x, CO и CH_x. С учетом гигиенической оценки индивидуального состава ОГ дизелей можно выделить следующие основные группы токсичных веществ: NO_x, C, бенз(а)пирен, CO, CH_x и RCHO.

Оксиды азота. Несмотря на то, что оксид (NO) и диоксид (NO₂) азота обычно объединяются вместе как оксиды азота (NO_x), в цилиндрах дизеля в значительных количествах образуется только NO. Разработано большое количество моделей механизма его 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 эндотермической реакции атомарный азот реагирует с молекулярным кислородом с выделением теплоты по экзотермическим реакциям



Скорость суммарной реакции (12) определяется следующим уравнением:

$$\frac{dNO}{dt} = K_1 N_2 O_2 - K_2 [NO]^2, \quad (13)$$

где N₂ и O₂ — концентрации азота и кислорода, г/м³; [NO] — равновесная концентрация NO, г/м³; K₁, K₂ — константы скорости прямых и обратных реакций.

При условии dNO/dt = 0 равновесная концентрация оксида азота получается при известных значениях констант в следующем виде:

$$[NO] = 4,6 \sqrt{O_2 N_2} \exp\left(-\frac{90 \cdot 10^3}{RT}\right). \quad (14)$$

Из (14) следует, что равновесная концентрация NO более 1 г/м³ будет при температуре более 1600 °С и удваивается при повышении температуры через каждые 200...250 °С. В отличие от других токсичных компонентов ОГ дизеля, являющихся продуктами неполного сгорания топлива, его частичного окисления и термического разложения, образование 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 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 NO не образуется. При горении топлива в ядре струи и пленки топлива на стенке увеличивается средняя температура в цилиндре, что приводит к повышению концентрации NO в зонах обедненной смеси и в оставшемся воздухе. В свою очередь, при более высокой температуре пламени в ядре образование NO зависит от локальной концентрации кислорода. Во время хода расширения уровень концентрации 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 NO_x во впускном заряде может оказывать заметное влияние на характеристики процесса сгорания и образование токсичных веществ. Это влияние зависит от количества NO_x, поступающего с

остаточными газами во впускной заряд, а также от чувствительности различных процессов к воздействию NO_x .

В ОГ содержится до 10 различных оксидов азота. Перекиси типа NO_3 , N_2O_6 , N_3O_4 и N_2O_7 мгновенно распадаются до NO_2 и кислорода. Однако, как правило, более 95 % образовавшихся оксидов азота приходится на долю NO . При температурах ниже 400 °С оксид азота начинает окисляться до NO_2 по следующей реакции:

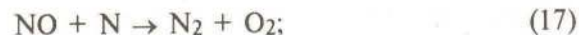


Во время рабочего процесса возможны реакции NO_x с CO_2 , H_2O , H_2 и CO . Однако гораздо легче идут реакции азота с водой или CO_2 . Поэтому NO фактически единственный из оксидов азота, который играет определенную роль в процессе сгорания дизеля. Количество NO в ОГ практически соответствует их образовавшемуся количеству при максимальных температурах цикла. Вид топлива не оказывает заметного влияния на образование NO при прочих равных условиях. Наибольшее количество NO образуется при работе двигателя на топливе с ароматическими углеводородами, а наименьшее — при работе на парафиновых топливах. Другие топлива в этом смысле — промежуточные.

При больших температурах скорость реакции высока и равновесие устанавливается быстро. В процессе расширения по мере уменьшения температуры скорость реакции быстро падает. Равновесная постоянная в итоге снижается до нуля (или почти до нуля) к концу расширения. Поскольку при расширении равновесие NO снижается, скорость распада NO — это ограничивающий кинетический параметр. Бимолекулярный механизм распада NO можно представить следующей реакцией:



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



При реальных процессах сгорания в дизеле действуют оба механизма. Бимолекулярный механизм доминирует при низких тем-

пературах (до 1230 °С), а механизм Я. Б. Зельдовича при более высоких.

Сажа. В ОГ дизеля содержатся следующие виды частиц:

жидкие, 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 КС дизелей, — это частицы сферической формы диаметром 0,015...0,17 мкм с удельной геометрической поверхностью до 75 м²/г, которые из-за коагуляции в процессе сгорания образуют вторичные и третичные структуры, выбрасываемые с ОГ из системы выпуска дизеля в атмосферу.

Последними исследованиями установлено, что 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 — основной 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 КС, 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 зонах обедненной смеси, 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 КС.

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, температуры и времени пребывания частиц в КС. 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 топливopодачи, переходных режимов работы двигателя, эксплуатационных факторов и регулировок.

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

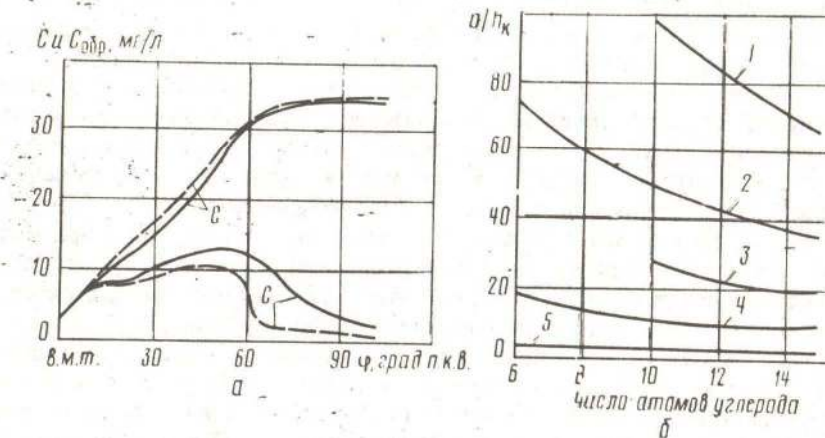


Рис. 2. Влияние некоторых параметров на содержание сажи в ОГ дизеля:
 а — влияние угла поворота коленчатого вала (ϕ) на количество образовавшейся ($C_{обр}$) и оставшейся (C) сажи в ОГ дизеля ($p_c = 0,71$ МПа): — при работе на дизельном топливе; --- при работе на дизельном топливе с присадкой 0,05%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

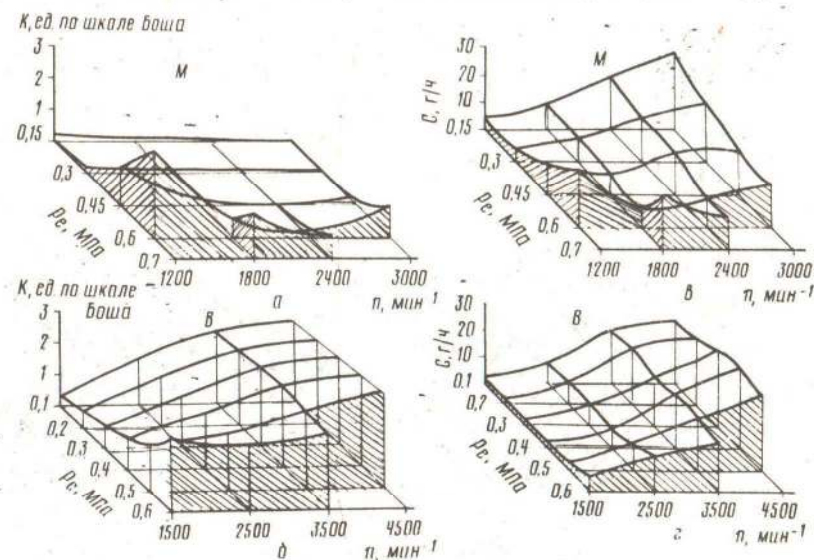


Рис. 3. Сажесодержание в ОГ (K) и выброс частиц (G_c) в зависимости от режимов работы дизелей:
 а и в — дизели с М-процессом (М); б и г — вихрекамерного дизеля (В)

в выпускном трубопроводе двигателя, причем тем интенсивнее, чем выше температура ОГ. Последнее обстоятельство — одна из причин несопоставимости результатов исследований, производимых в различных точках выпускного трубопровода.

Склонность топлива 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 (нафталины, 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 КС, 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 саже-содержание ОГ вихрекамерного дизеля возрастает по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала в области повышенных

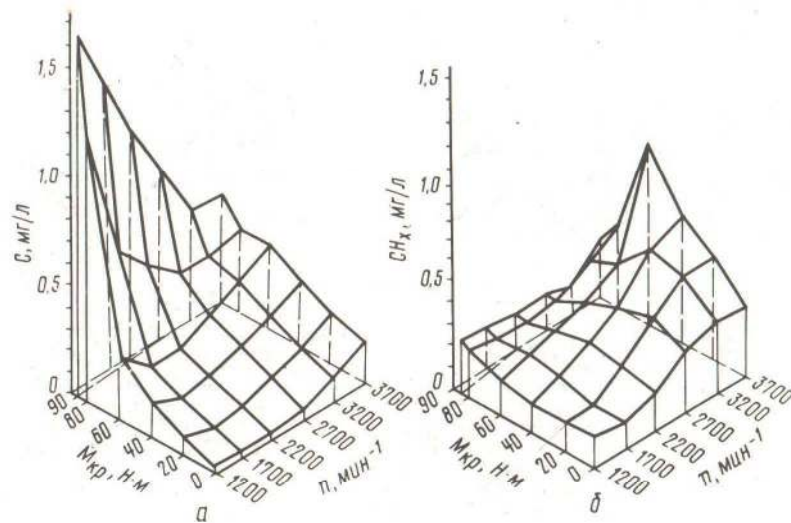


Рис. 4. Содержание C и CH_x в ОГ в зависимости от режимов работы дизелей с непосредственным впрыскиванием: а — содержание C ; б — содержание CH_x

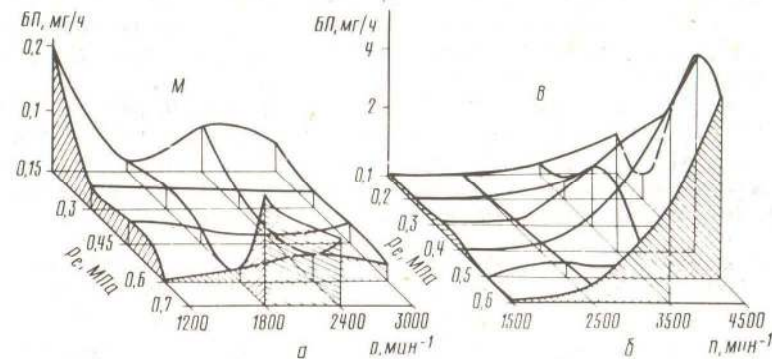


Рис. 5. Выбросы (G_{bp}) с ОГ в зависимости от режима работы дизелей: а — с непосредственным впрыскиванием, работающего по М-процессу (М); б — вихрекамерного (В)

и (близких к номинальным), а в дизеле с неразделенной КС оно в первую очередь зависит от нагрузки.

Для вихрекамерного дизеля возрастание выброса твердых частиц так же, как и саже-содержания, наблюдается при увеличении частоты вращения. Для дизеля с неразделенной КС с М-процессом (М) максимальные значения саже-содержания и выброса частиц находятся на одинаковых режимах, однако при максимальной частоте вращения коленчатого вала в режиме 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 одновременно и наиболее токсичен. Поэтому канцерогенные свойства ОГ принято характеризовать бенз(а)пиреном. 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 в ОГ сажи, приводит и к уменьшению содержания в ОГ

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

Между концентрацией в ОГ сажи (ед. по шкале Боша), частиц (мг/м³), суммарной концентрацией всех полициклических ароматических углеводородов, мутагенов и бенз(а)пирена для дизеля с непосредственным впрыскиванием и вихрекамерного дизеля получены [64] корреляционные зависимости (табл. 14).

14. КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ САЖИ, ЧАСТИЦ, ПАУ, МУТАГЕНОВ И БЕНЗ(А)ПИРЕНА ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Наименование	Концентрация				Тип дизеля
	частиц	ПАУ	мутагенов	бенз(а)пирена	
Сажа	0,93	0,84	0,77	0,72	Вихрекамерный
	0,80	0,66	0,39	0,42	с М-процессом
Частицы	—	0,80	0,67	0,66	Вихрекамерный
	—	0,52	0,44	0,45	с М-процессом
ПАУ	—	—	0,97	0,93	Вихрекамерный
	—	—	0,81	0,84	с М-процессом
Мутагены	—	—	—	0,97	Вихрекамерный
	—	—	—	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 бенз(а)пирена.

Оксид углерода. Реакция догорания оксида углерода — конечная стадия реакции горения углеводородов. Он образуется как промежуточный продукт химической реакции углеводородсодержащего топлива с кислородом. Промежуточной реакцией принято считать реакцию метильного радикала с молекулярным кислородом:



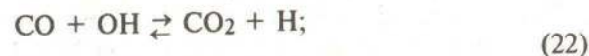
после которой СО образуется в основном по реакции



В меньшей степени СО образуется по реакции



Механизм превращения СО в СО₂ 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 досточной для практических целей точностью оценить и объяснить наблюдаемые явления. В цилиндрах дизеля СО образуется в большей мере по следующим причинам:

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

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

На рисунке 6 показана схема образования зон, обогащенных СО, являющихся одной из причин содержания оксида 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.

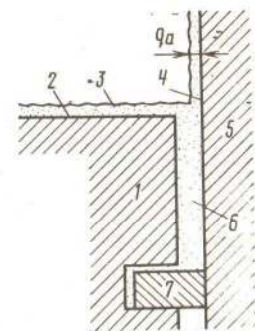


Рис. 6. Схема образования зон, обогащенных СО: 1 — поршень; 2 — несгоревшая топливовоздушная смесь; 3 — частично сгоревшая топливовоздушная смесь; 4 — холодный пристеночный слой; 5 — стенка цилиндра; 6 — зазор с холодным пристеночным слоем; 7 — поршневое кольцо; q_a — толщина холодного пристеночного слоя

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, обогащенных 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 струи невысока. В этих условиях основным источником несгоревших углеводородов является срыв пламени в зонах с обедненным составом смеси. 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.

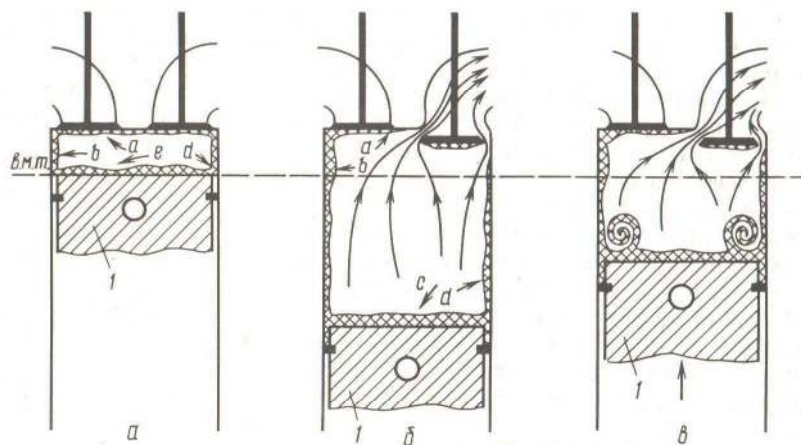


Рис. 7. Схема образования холодных пристеночных слоев в дизеле:

a — положение поршня в в.м.т.; *б* — положение поршня в н.м.т.; *в* — положение поршня в такте выпуска ОГ; *a, в, с, d, e* — пристеночные слои, обогащенные углеводородами; *1* — поршень

На режимах, близких к номинальным, при образовании в ядре и у стенок КС большого количества несгоревших углеводородов удельный вклад срыва пламени в зонах с обедненным составом смеси 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 срыва пламени при обедненном составе смеси. Углеводороды ОГ в основном состоят из молекул исходного топлива, т. е. высокомолекулярны. По мере роста нагрузки уровень температур рабочего процесса заметно увеличивается. Обогащенная 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 — CO_2 и H_2O , 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. Они образуются при протекании предпламенных реакций в период подготовки топливовоздушной 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 (Германия) 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 холостом ходу позволяет уменьшить их концентрацию в ОГ соответственно на 75 и 90 % [66].

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

5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОКСИЧНОСТЬ И ДЫМНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

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 NO_x , приводят к характерной закономерности образования оксидов азота. На рисунке 8,а представлены концентрации NO_x , CH_x , CO и дымность ОГ современных зарубежных дизелей «Deutz» [67] с различными способами смесеобразования в зависимости от нагрузки. По мере ее увеличения количество продуктов неполного сгорания в ОГ растет. При увеличении $p_e > 0,5$ МПа возрастает и дымность ОГ дизелей. Концентрация NO_x по мере роста нагрузки сначала увеличивается (до $p_e = 0,5...0,6$ МПа), затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться. При нагрузке 70...85 % (p_e до 0,5...0,6 МПа) увеличение NO_x связано с ростом максимальных температур. При дальнейшем увеличении нагрузки на темп образования NO_x в основном влияет концентрация кислорода в заряде.

Дизели с М-процессом по содержанию в ОГ NO_x близки к дизелям с объемным смесеобразованием. На малых нагрузках и при работе на холостом ходу в ОГ всех типов дизелей содержится достаточно большое количество CH_x . При увеличении нагрузки до $p_l = 0,3...0,5$ МПа их концентрация достигает минимума и затем по мере увеличения нагрузки начинает вновь возрастать. Это связано с тем, что на малых нагрузках на образовании 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 CO .

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

При увеличении n скорость сгорания также возрастает, 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 рост турбулентности воз-

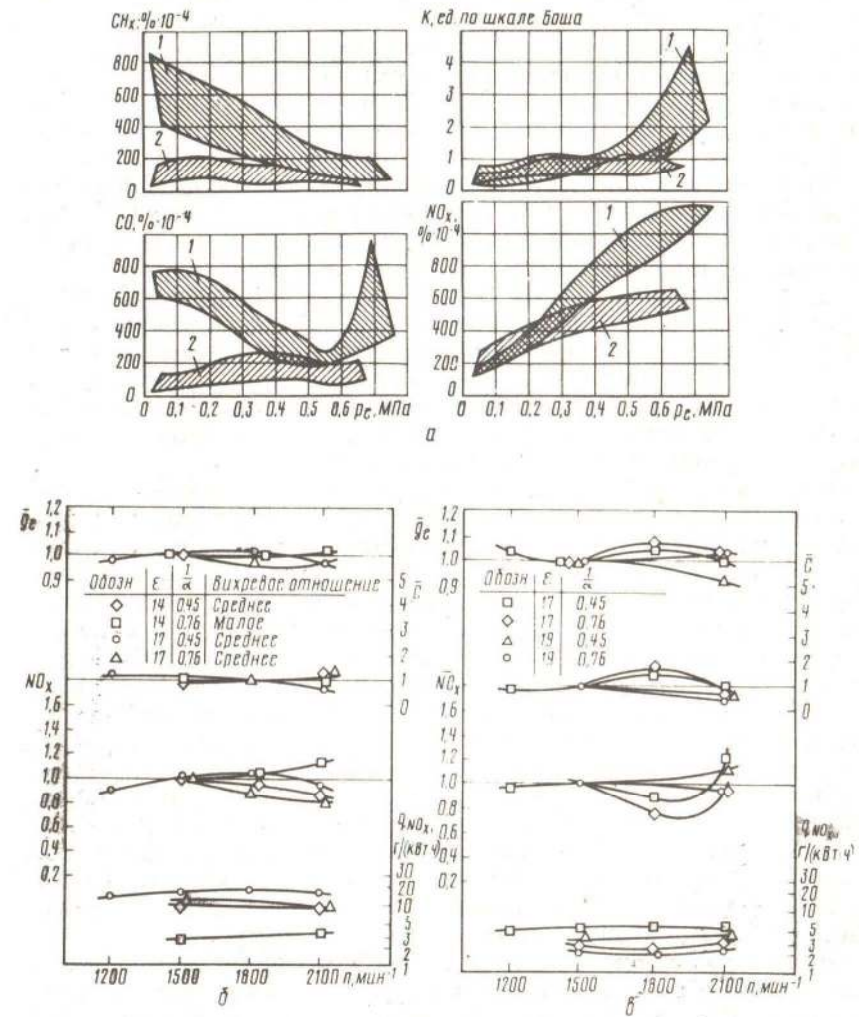


Рис. 8. Влияние параметров дизелей на токсичность и дымность ОГ:

а — сравнительная токсичность дизелей фирмы «Deutz» с непосредственным впрыскиванием топлива и с разделенной КС: 1 — дизель F12L413 с непосредственным впрыскиванием топлива ($n = 1000...2500 \text{ мин}^{-1}$); 2 — дизель F8L413 с разделенной КС ($n = 1000...2650 \text{ мин}^{-1}$); б — влияние частоты вращения у дизеля с непосредственным впрыскиванием; в — влияние частоты вращения на удельный выброс и относительные изменения параметров у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25 %); г. С. NO_x — относительные изменения параметров; g_{NO_x} — удельный выброс

душного заряда, но ухудшают наполнение цилиндров. При этом также увеличивается давление впрыскивания топлива, в результате чего топливо распыляется более качественно. Таким образом, влияние частоты вращения на процесс сгорания противоречиво и характеризуется многочисленными факторами, усиливающими и уменьшающими образование 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 NO_x известно. Увеличение частоты вращения коленчатого вала большинства дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива приводит к снижению выбросов NO_x и увеличению g_e (рис. 8, б) [67].

Закономерность выброса NO_x в дизелях с разделенной КС — обратная (рис. 8, в). В целом увеличение частоты вращения коленчатого вала незначительно влияет на выбросы дизелями NO_x .

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

Степень сжатия. Увеличение степени сжатия ϵ приводит к росту 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 в.м.т. В результате при увеличении ϵ топливо интенсивно смешивается и сгорает при повышенной максимальной температуре. Увеличение температурного цикла рабочего процесса дизеля при прочих равных условиях увеличивает образование 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 ростом теплоотдачи между стадиями увеличение ϵ оказывает обратное воздействие на образование токсичных компонентов — снижается образование NO_x и возрастает выброс сажи (рис. 9, б).

Вихреобразование. Усиление вихреобразования улучшает процессы испарения, смесеобразования и сгорания в дизеле. Топливо-воздушная смесь становится более гомогенной, и образование NO_x увеличивается (рис. 9, в). При этом повышению концентрации NO_x способствует (вследствие улучшения подготовки топливовоздушной смеси) раннее тепловыделение (при положении поршня в в.м.т.) 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 ускоряется диффузия кислорода к парам топлива, что увеличивает догорание сажи и продуктов неполного сгорания во время хода расшире-

5.8.51

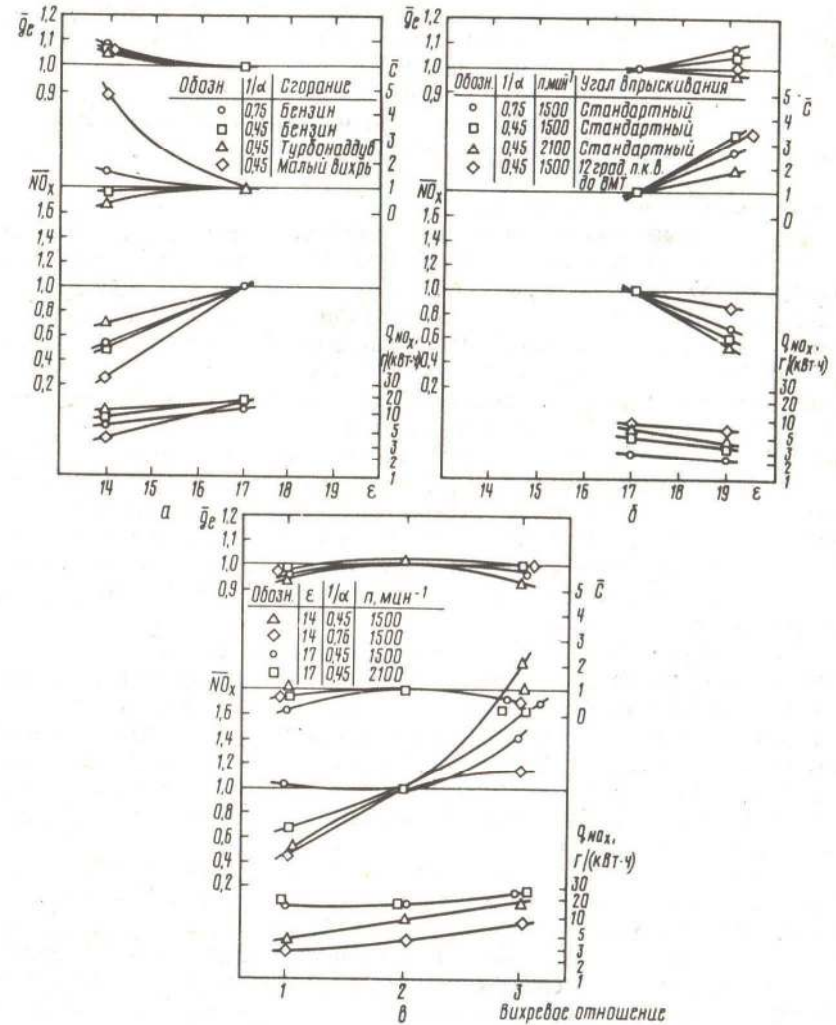


Рис. 9. Влияние параметров дизелей на токсичность и дымность ОГ: а — влияние степени сжатия у дизеля с непосредственным впрыскиванием ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}$); б — влияние степени сжатия у дизеля с предкамерой (объем предкамеры составляет 25 %); в — влияние вихревого отношения у дизеля с непосредственным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

ния. Рост степени вихреобразования интенсифицирует процесс смесеобразования, улучшает экономические показатели двигателя (g_e), снижает выбросы CO, сажи и приводит к увеличению образования NO_x . Следует заметить, что чрезмерное перезавихривание 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.

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°C температура в конце такта сжатия повышается на 175°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°C , а меньше. Ее рост приводит к значительному повышению максимальной температуры цикла. В таких условиях скорость образования NO_x увеличивается в 2 раза, однако выброс NO_x — только на 10...15 % (рис. 10, а, б).

Температура впускного воздуха практически не оказывает влияния на выброс сажи. С одной стороны, при ее увеличении 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 воды (жидкости) в системе охлаждения дизеля. Снижение температуры охлаждающей воды приводит к увеличению весового заряда, поступающего в цилиндры, повышает α , снижает температуру впускной смеси в конце такта сжатия и максимальную температуру цикла. Несмотря на увеличение α , снижение общей температуры цикла в итоге приводит к уменьшению концентрации NO_x в ОГ дизеля.

Давление воздуха на впуске. На рисунке 10, в и г показано влияние турбонаддува с промежуточным охлаждением на выброс NO_x , относительное изменение NO_x , сажи и g_e . Турбонаддув с промежуточным охлаждением существенно увеличивает плотность воздушного заряда, что приводит к более полному сгоранию топлива, снижает задержку впрыскивания и изменяет дальность топливной струи. Промежуточное охлаждение не при-

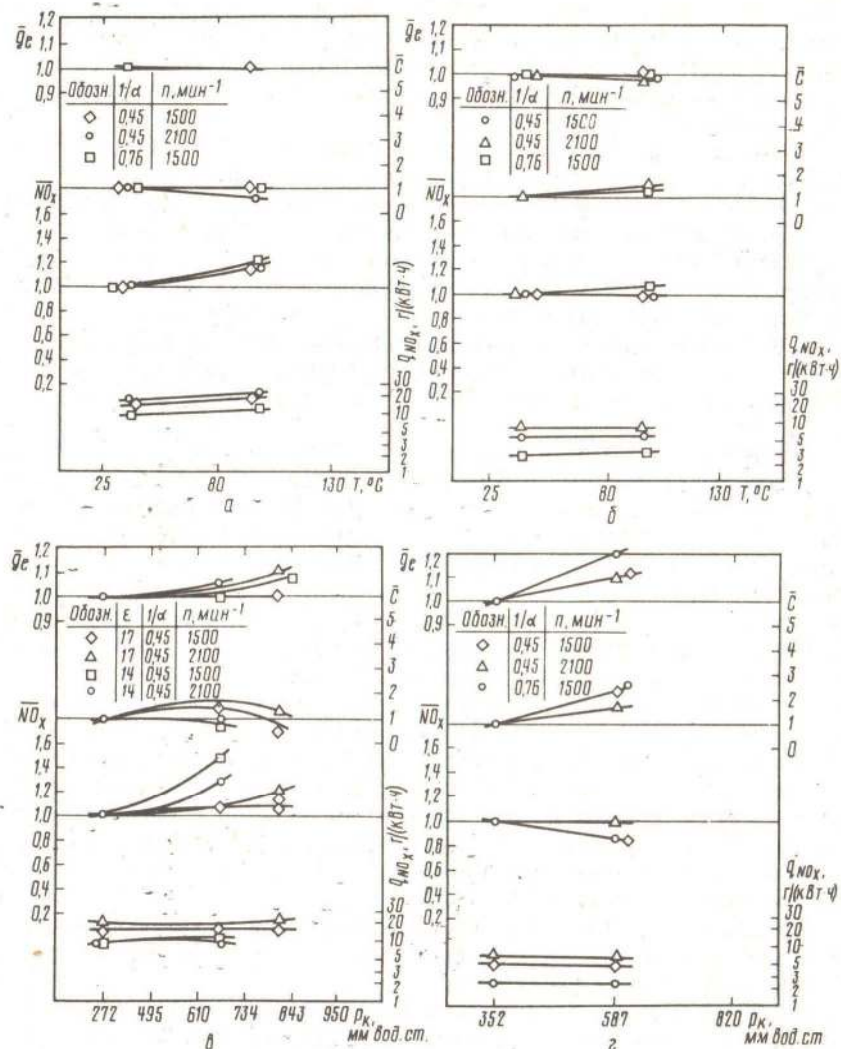


Рис. 10. Влияние параметров воздушного заряда на впуске дизеля на токсичность и дымность ОГ ($\epsilon = 17$):

а — влияние температуры воздуха в впускном трубопроводе у 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 %).

водит к заметному изменению температуры воздуха на впуске, а следовательно, и температуры пламени, и поэтому уровень содержания NO_x изменяется незначительно. Однако при применении наддува уменьшается удельный расход топлива, а следовательно, и удельный выброс NO_x , что и приводит к снижению токсичности ОГ дизелей при применении наддува.

Одновременно со снижением удельного выброса NO_x для дизелей с наддувом характерен вследствие увеличения α очень низкий выброс углеводородов, CO и самый низкий уровень дымления.

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

Наибольшая разница концентраций NO_x на неустановившихся 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 концентрация NO_x близка к значениям концентраций на установившихся режимах. При разгоне дизеля после кратковременной работы на холостом ходу 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 неустановившихся 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 неустановившихся 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 неустановившихся и установившихся режимах меньше, чем это наблюдается для концентраций NO_x и CH_x .

При работе дизеля на установившихся и неустановившихся 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 неустановившемся 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 КС [17].

Анализ конструкций КС дизелей показывает, что единой тенденции в их развитии нет, хотя наибольшее развитие получили различные модификации дизелей с КС 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-плечный тип смесеобразования. В них различными средствами решаются вопросы обеспечения мягкого и экономичного процесса сгорания. Камеры сгорания в поршне бывают 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 часть топлива попадает в виде пленки или капельной структуры на стенки КС.

В получивших наибольшее распространение КС полукрытого типа применяют многодырчатые распылители, при впрыскивании топлива из которых факелы распыленного топлива взаимодействуют с перемещающимся в КС воздушным зарядом. В этих камерах основная форма движения воздушного заряда — 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 используют торoidalные камеры с коническим выступом в центре.

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

Дизели с открытыми КС имеют высокоэффективные показатели, низкий расход топлива, просты конструктивно. Рабочий процесс в этих дизелях отличается высоким уровнем температур и давлений, что способствует образованию NO_x и одновременно снижению содержания в отработавших газах CO и CH_x . У дизелей с открытой КС наблюдается повышенное дымление, особенно при работе по внешней характеристике. К недостаткам таких камер следует отнести относительно высокие скорости нарастания давления ($dp/d\varphi \approx 1,0 \dots 1,3$ МПа/град) и максимальные давления цикла (в дизелях без наддува p_z достигает $9 \dots 12$ 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.

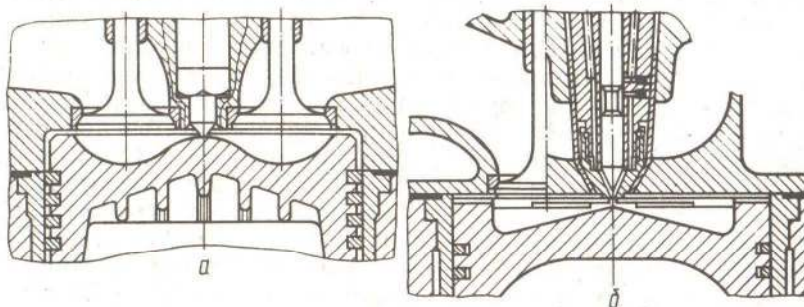


Рис. 11. Камеры сгорания открытого типа:
а — типа Гессельман; б — типа Гессельман фирмы «Камминс»

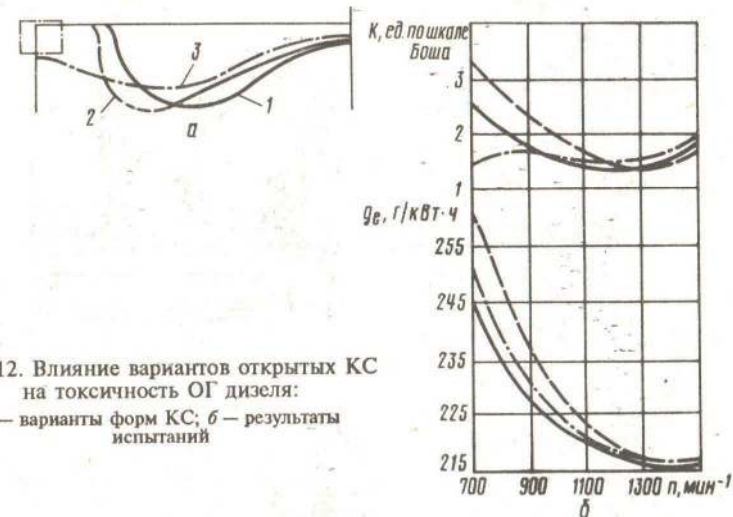


Рис. 12. Влияние вариантов открытых КС на токсичность ОГ дизеля:
а — варианты форм КС; б — результаты испытаний

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° вместо 140° 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 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

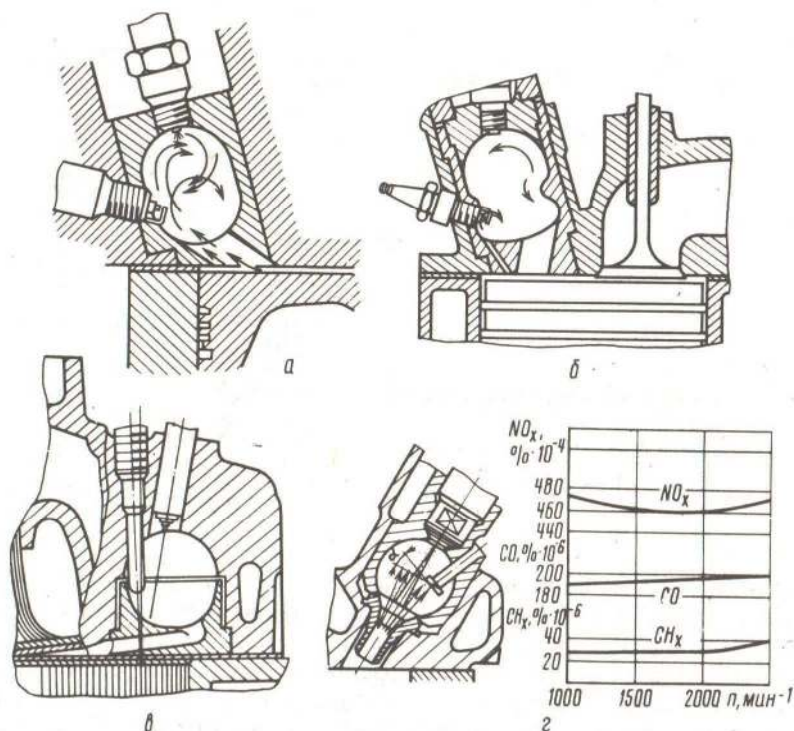


Рис. 13. Предкамеры дизелей:

а и б — «Тойота»; в — «Дженерал Моторс»; г — «Манхайм» с показателями токсичности

(100...200 м/с) дизель принято характеризовать как вихрекамерный. У него относительный объем вихревой КС, как правило, равен $V_{кв}/V_c = 0,4...0,6$, площадь сечения соединительных отверстий составляет 0,8...2,7 % площади поршня, форсунки закрытого типа с штифтовым распылителем и с относительно низким давлением затяжки иглы.

Высокая степень использования 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 $V_{кв}/V_c = 0,25...0,4$, относительная площадь соединительных каналов равна 0,3...0,6 % площади поршня. Перетекание смеси из предкамеры в основную КС происходит при скорости 230...320 м/с за 15...20° до прихода поршня в в.м.т.

Наибольшее распространение разделенные КС нашли на дизелях малой размерности. Дизели с непосредственным впрыскивани-

ем 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 в.м.т., когда имеются наилучшие условия для образования NO_x , а малые концентрации CO , CH_x , $RCHO$ и C связаны с ускорением реакций окисления частичек топлива при высокой скорости перетекания 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 топлива и с разделенной КС показаны на рисунке 8, а [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 впрыскивания топлива.

Количество впрыскиваемого топлива. Уменьшение количества впрыскиваемого топлива (т. е. его цикловой подачи) приводит к повышению α , что увеличивает полноту сгорания топлива и снижает выброс дизелем сажи, CO и CH_x ; выброс NO_x при этом практически не изменяется, а в некоторых случаях может даже возрасти.

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 α в первом приближении идентичен для двигателей всех типов и не зависит от способа изменения α . Однако в зависимости от совершенства рабочего процесса, технического состояния двигателя и состава топлива абсолютные значения концентрации сажи при одном и том же значении α 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 α к коэффициенту избытка воздуха, соответствующего 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 α 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 $0,1 < C < 1,2$ мг/л с достаточной для практических целей точностью описывается эмпирической формулой

$$C = 1,2 \frac{\alpha_{0,4}}{\alpha} - 0,75, \quad (24)$$

или для $\alpha/\alpha_{0,4}$ в виде $\alpha/\alpha_{0,4} = 1,2/(C + 0,75)$.

Угол опережения впрыскивания топлива. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива дизеля Д-240 на концентрацию в ОГ NO_x , CH_x и удельный расход топлива в зависимости от среднего эффективного давления для заданного скоростного режима работы двигателя представлены на рисунке 15.

Как следует из приведенных данных, содержание NO_x в ОГ дизеля Д-240 возрастает с увеличением θ во всем диапазоне исследованных скоростных режимов.

Зависимость содержания NO_x в ОГ от среднего эффективного давления имеет более сложный характер. Для больших значений θ соответствующие кривые имеют ясно выраженный максимум. Для угла опережения 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

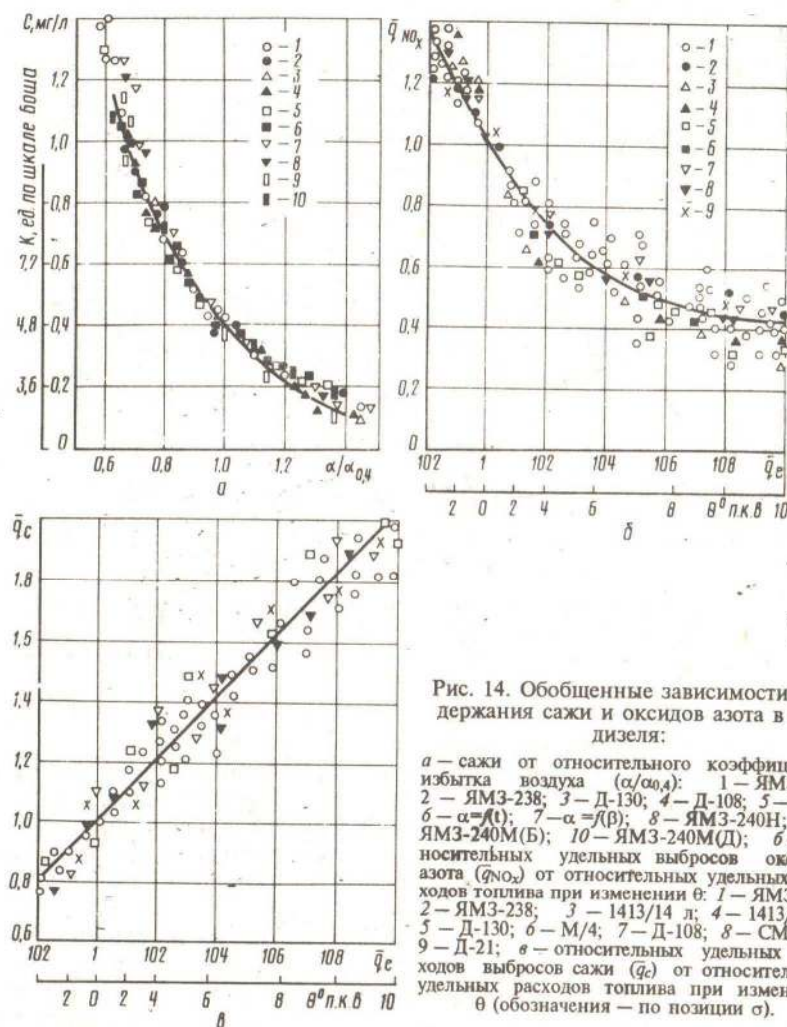


Рис. 14. Обобщенные зависимости содержания сажи и оксидов азота в ОГ дизеля:

α — 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 — $\alpha=f(\theta)$; 7 — $\alpha=f(\beta)$; 8 — ЯМЗ-240Н; 9 — ЯМЗ-240М(Б); 10 — ЯМЗ-240М(Д); θ — относительных удельных выбросов оксидов азота (q_{NO_x}) от относительных удельных расходов топлива при изменении θ : 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; θ — относительных удельных расходов выбросов сажи (q_c) от относительных удельных расходов топлива при изменении θ (обозначения — по позиции σ).

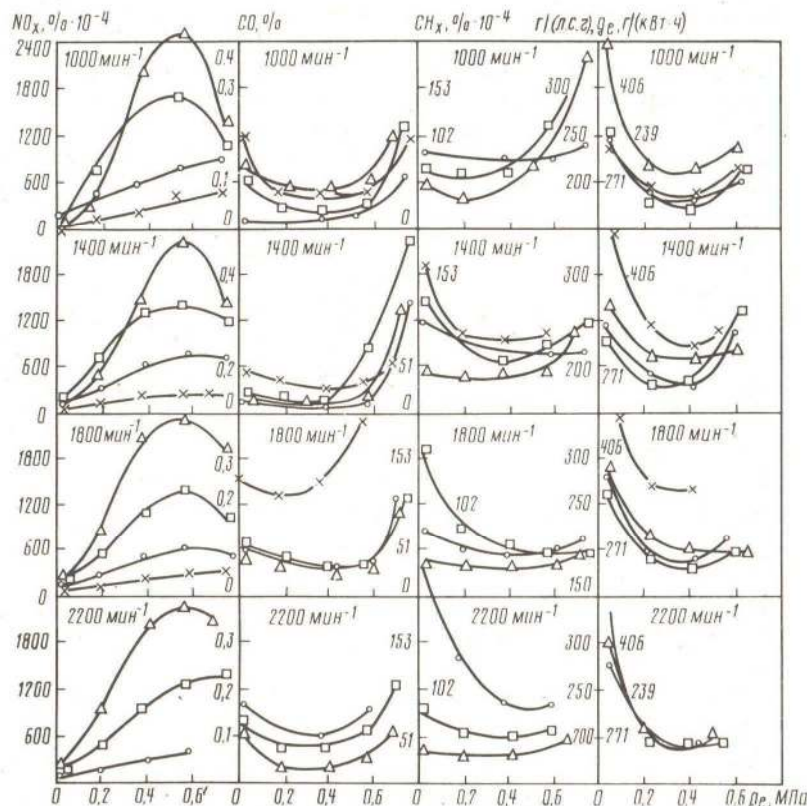


Рис. 15. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива на токсичность ОГ и экономичность дизеля Д-240:

Δ — 30 град п.к.в. до в.м.т.; □ — 26 град п.к.в. до в.м.т.; о — 18 град п.к.в. до в.м.т.; х — 9 град п.к.в. до в.м.т.

номинального $\theta = 26$ град п.к.в. абсцисса максимума возрастает с увеличением частоты вращения коленчатого вала.

При меньших установочных θ кривые содержания 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 $0,15 < p_e < 0,3 \text{ МПа}$.

При увеличении θ от 26 до 30 град п.к.в. максимальное содержание NO_x возрастает 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 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 содержание NO_x падает и составляет при полной нагрузке $0,7 \cdot 10^{-3} \%$ для 1400 мин^{-1} ; $0,6 \cdot 10^{-3} \%$ для 1800 мин^{-1} ; $0,5 \cdot 10^{-3} \%$ для 2200 мин^{-1} . Дальнейшее уменьшение θ до 9 град п.к.в. снижает содержание NO_x примерно в 2 раза по сравнению с углом в 18 град п.к.в.

График зависимости содержания CH_x от нагрузки имеет вид выгнутой параболы. Для низких частот вращения (до 1000 мин^{-1}) наблюдается тенденция более интенсивного возрастания концентрации 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 концентрации CH_x от θ 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 CH_x в ОГ двигателя Д-240. В целом можно отметить закономерность увеличения содержания CH_x с уменьшением θ .

Итак, уменьшение θ приводит к значительному снижению выбросов дизелем Д-240 оксидов азота, увеличению выбросов CO , CH_x и некоторому ухудшению его экономических показателей. Таким образом, разработать практические рекомендации на изменение стандартных регулировок угла опережения 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 рисунках 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 NO_x и сажи и изменением угла опережения 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 CO , CH_x из-за серьезных нарушений в процессе сгорания необходимо уменьшить θ 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 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 (C , CO , CH_x , RCHO и др.). В результате дополнительных мероприятий появляется возможность снижения выброса с ОГ и NO_x .

Впрыскивание топлива в КС начинается за 10...25 град п.к.в. до в.м.т. 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 каналы, определяемых давлением топлива в форсунке (для большинства отечественных автотракторных дизелей $p_{впр} = 15...35$ 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 $^{-1}$, $\epsilon = 19,5$) 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» PESIMP с плунжером диаметром 10 мм, ходом 2,8 мм, максимальной цикловой подачей 150 мм 3 за цикл, длиной трубопровода высокого давления 925 мм при диаметре

2 мм; форсунки DLLA 150 S/86 с четырьмя сопловыми отверстиями при усилии затяжки пружины иглы форсунки 17,5 МПа.

Экспериментальная система с увеличенной энергией впрыскивания топлива включала в себя 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 затяжки пружины иглы форсунки 50 МПа. Повышение 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 КС (рис. 16, б). Кинорегистрация процессов смесеобразования и сгорания позволила установить, что при впрыскивании топлива в КС с вихревым движением воздушного заряда процесс смесеобразования начинается примерно в один и тот же момент времени. Однако при увеличенной энергии впрыскивания сгорание проте-

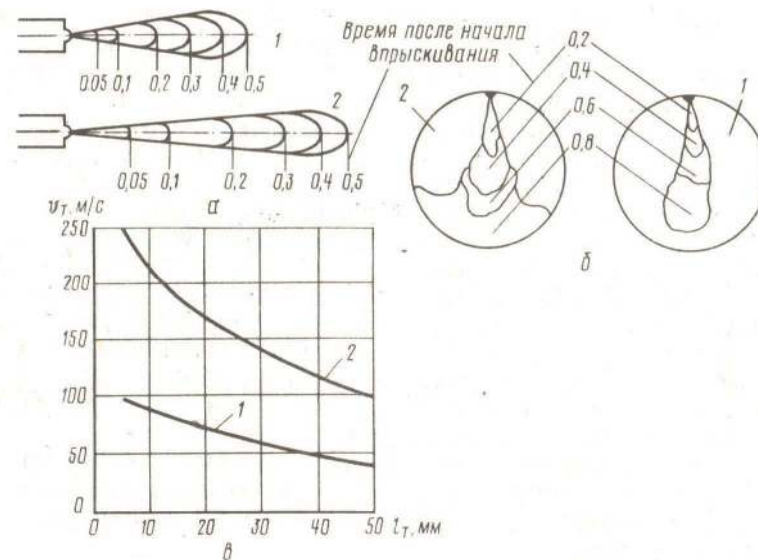


Рис. 16. Влияние давления впрыскивания топлива ($p_{впр}$) форсункой на структуру топливной струи и процесс ее испарения:

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

кает 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. продолжительность сгорания топлива при интенсификации его впрыскивания резко сокращается.

При проведении стендовых испытаний на одноцилиндровом двигателе с $V_h = 1,8$ л, $D/S = 12,8/14$; $\varepsilon = 17,4$ 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 углеродородов 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 NO_x в ОГ и 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 1Ч 13/14, но при оптимальной установке угла опережения впрыскивания топлива его величина уменьшилась (рис. 17), что способствовало наряду со снижением выброса с ОГ C, CO, CH_x , уменьшению выброса NO_x (рис. 17, а) и удельного расхода топлива до 5 г/(кВт·ч) (рис. 17, б).

В исследованном диапазоне давления впрыскивания 30...72 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 заширмлением впускных клапанов, установкой во впускных патрубках вставок спиральной формы, дросселированием потока клапанами с переменным объемом. Органи-

878

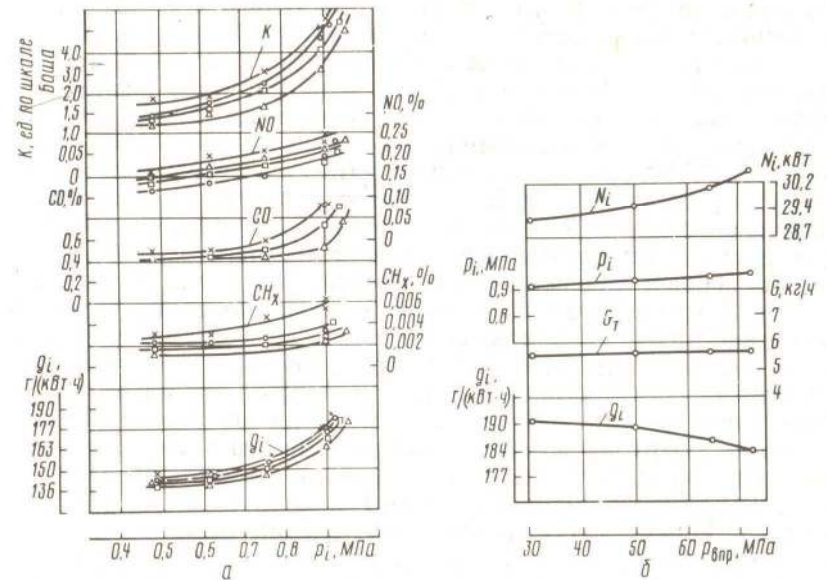


Рис. 17. Влияние интенсивности впрыскивания топлива ($p_{впр}$) на токсичность и дымность ОГ (а), а также на индикаторные показатели дизеля (б):

Δ — $p_{впр.н} = 72$ МПа; \square — $p_{впр.н} = 65$ МПа; \circ — $p_{впр.н} = 50$ МПа; \times — $p_{впр.н} = 30$ МПа; $n = 2100$ мин $^{-1}$

зация 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 конструкцию с литым корпусом всего насоса и коваными корпусами секций, имеет давление подачи до 85 МПа (в классических типах А давление подачи до 60 МПа). У нового насоса R7100 увеличены до 12 мм диаметр и ход плунжера, его конструкция выдерживает давление до 100 МПа.

Современные конструкции форсунок оснащены штифтовыми и дырчатыми распылителями типа PD. Давление начала впрыскивания у штифтовых форсунок составляет около 13 МПа. В современных форсунках давление впрыскивания регулируется фирмами: «Ford» (США) — на 25...29 МПа; «Fendt» (Германия) — на 22; «Lamborg hini» (Италия) — на 18...23; «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 при-

чине 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 конвертации его для работы на альтернативных видах топлива. Указанный ТНВД применяет и фирма «Isuzu» на базовых дизелях BRAIT, 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 в себя блок микропроцессора, датчики положения педали управления, частоты вращения коленчатого вала, положения в.м.т., 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, заложенной в микропроцессор, и при их расхождении исполнительные устройства корректируют подачу и момент впрыскивания топлива. Одни из преимуществ электронного регулятора — строгое обеспечение задаваемой характеристики 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 образования 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/см³ 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: прогрева и испарения частиц, воспламенения и горения паров топлива с одновременным пиролизом (термической диссоциацией) тяжелых углеводородов в паровой фазе, выгорания свободного углерода и, далее, прогрева и выделения свободного углерода.

Одним из перспективных направлений снижения токсичности может быть применение эмульсии 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, работа с присадкой газа при подаче его либо в цилиндры, либо во впускные трубопроводы.

Для соответствия топлива всем фазам сгорания дизельного процесса оптимальным является подбор 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 типов топлив (с цетановым числом 35 и 59) на содержание 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 обедненной смеси находится большее количество топлива, чем достигается высокий уровень температур смеси. По этой причине образуется большее количество

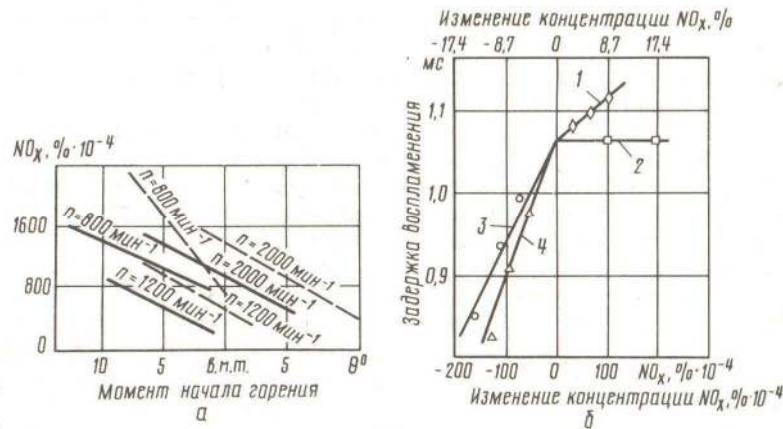


Рис. 18. Влияние топлива на содержание оксидов азота в ОГ дизеля:

a — влияние цетанового числа топлива на содержание в ОГ оксидов азота: — — цетановое число 59; - - - - цетановое число 35; *b* — взаимосвязь между периодом задержки воспламенения и содержанием NO_x в ОГ дизеля: 1 — изоамиловый спирт; 2 — нитрометан; 3 — изоамилнитрат; 4 — пироксид бутила

во NO_x . Топлива с большим цетановым числом — причина 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 CO с ОГ. Присадки, уменьшающие задержку воспламенения (изоамилнитрат, пироксид бутила и др.), снижают содержание NO_x в ОГ, а увеличивающие задержку воспламенения, наоборот, увеличивают выброс 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 °C), температуре 10%-ной перегонки (от 179 до 242 °C) и температуре конца перегонки (от 220 до 338 °C), установлено, что содержание C_nH_x в ОГ изменялось от 0,9 до $3 \cdot 10^{-4}$ % при изменении температуры 10%-ной перегонки от 196 до 242 °C [70]. Облегчение головных фракций топлива также приводит к увеличению выброса углеводородов с ОГ. Так, в ре-

зультате использования дизельных топлив 1-D и 2-D, а также масла 10W, температура перегонки которых соответственно увеличивается, установлено, что при применении 1-D содержание C_nH_x в ОГ составляет в среднем $72 \cdot 10^{-6}$ %, а при применении масла 10W — $22 \cdot 10^{-6}$ %.

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 $\varepsilon = 14,5$ и головкой цилиндра с энергией вихря $E_v = 13 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$. Интенсификация впрыскивания осуществлялась за счет повышения скорости движения плунжера на рабочем участке профиля кулачка с увеличенной высотой профиля, обеспечивающей ход плунжера $h = 11 \text{ мм}$ (вместо стандартного $h = 10 \text{ мм}$). Результаты испытаний представлены в таблице 15.

15. ВЛИЯНИЕ ТОПЛИВА РФС НА ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

Тип топлива	Ход плунжера, мм	Частота вращения n , мин ⁻¹	Крутящий момент M_k , Н·м	Цикловая подача q_c , мм ³ /цикл	Давление наддува P_k , кПа	g_e , г/(кВт·ч)	p_c , МПа
Стандартное	10	1300	120	139	134	258	8,7
То же	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
То же	10	1750	90	97	154	239	8,25
»	11	1300	122	131	134	235	8,6
»	11	1750	90	103	154	239	7,7

Продолжение

Тип топлива	$(dp/d\varphi_{\text{max}})$, МПа/град	Продолжительность впрыскивания τ , град п.к.в.	Максимальное давление впрыскивания $p_{\text{впр}}$, МПа	Концентрация в ОГ			Дымность ОГ, ед. по шкале Боша
				CO_2 , %	C_nH_x , %	NO_x , %	
Стандартное	0,46	21	24	10	1,8	2	3,5
То же	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
РФС	0,5	22	24,7	8	1,7	2	4,8
То же	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

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 повышение максимального давления впрыскивания (на 1 град п.к.в. двигателя). Скорость нарастания давления при сгорании ($dp/d\varphi$) с увеличением h на 1 мм понизилась на 3%. Максимальное давление сгорания уменьшилось на 8%. Удельный эффективный расход топлива на режиме, соответствующем $M_{кmax}$, 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 NO_x на 20% и CH_x на 50%. Выбросы оксида 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 , $dp/d\varphi$, $p_{впр}$, а также на токсичность и дымность ОГ не отмечено. Не удалось установить 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 его массы. 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 (СНГ, Институт химии присадок АН Азербайджана) 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 диффузного догорания в обогащенных топливом зонах КС, являющихся центрами образования частиц сажи.

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

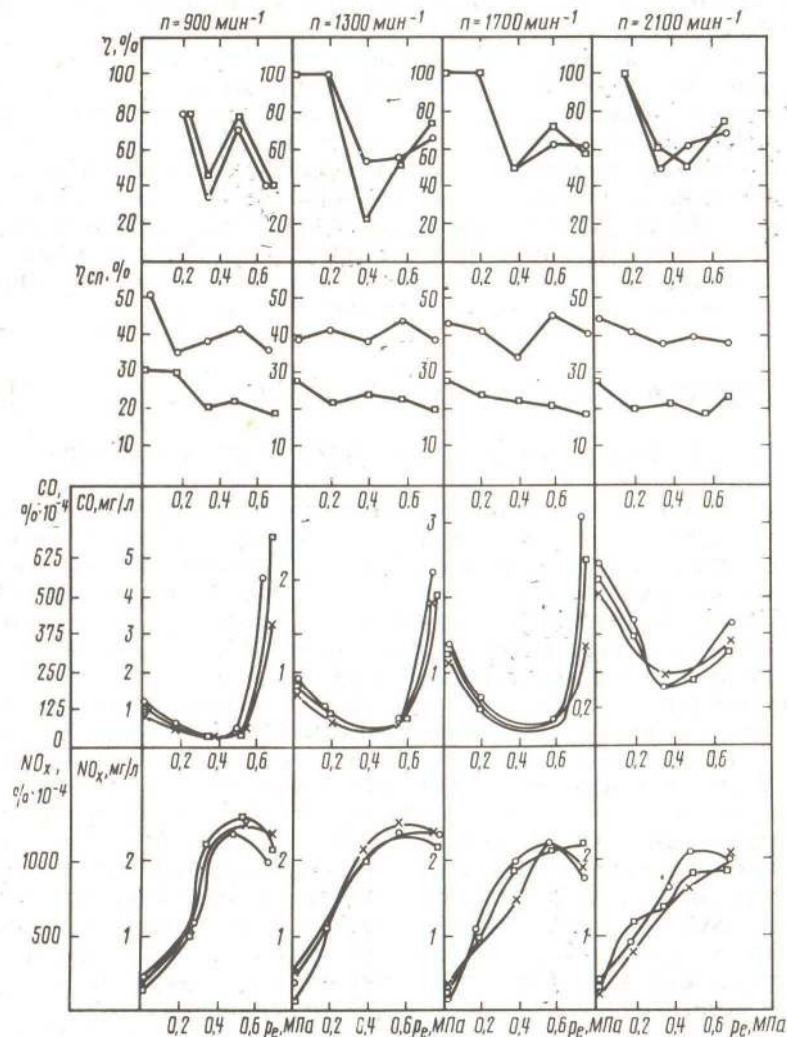


Рис. 19. Влияние антидымных присадок ИХП-706 и «Парадайн-12» на токсичность и дымность ОГ дизеля Д-240:
x — без присадок; o — ИХП-706; □ — «Парадайн-12»

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 бенз(а)пирена, при этом присадка ИХП-706 снижает содержание бенз(а)пирена в среднем на 40 %, а «Парадайн-12» — до 30 %. Эффективность присадок по отношению к бенз(а)пирену незначительно зависит от режимов работы испытанных дизелей. Содержание NO_x и CO 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

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 кратко 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 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 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 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).

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 «СЕМТ-Пилстик», предкамера которого имеет соплообразную геометрию соединительного канала (рис. 20, а). Камера сгорания дизелей этой фирмы серии РА4-185 и РА4-200 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 в.м.т. Из предкамеры смесь с высокой скоростью перетекает в основную КС через узкое кольцевое сечение только при положении поршня около в.м.т., 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 сократить 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 снижении дымности ОГ (не более единицы по шкале Боша) и уменьшении максимального давления сгорания до 25 % [17].

Определенный интерес по аналогии с приведенными результатами представляет КС в поршне по а. с. СССР № 547336 (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

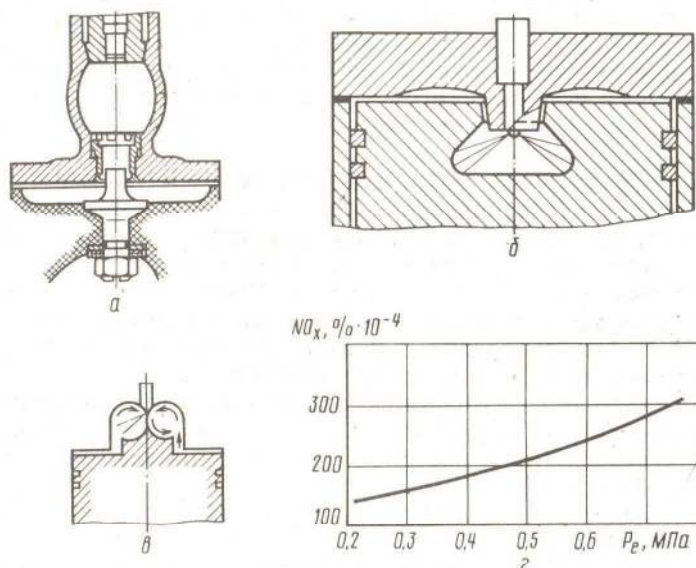


Рис. 20. Схемы КС с переменной геометрией соединительных каналов: а — КС «SEMT—Pielstick»; б — КС по а. с. СССР № 547336; в — КС с выступом на поршне; з — токсичность ОГ по NO_x КС с выступом на поршне

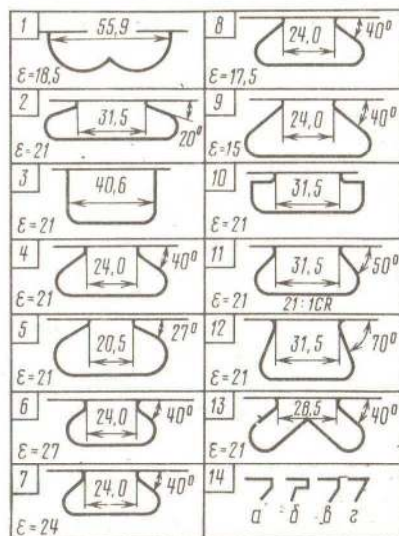


Рис. 21. Варианты конфигурации конструктивных элементов неразделенной КС фирмы «Perkins»

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 мин^{-1} (рис. 21).

По сравнению со стандартной открытой КС (вариант 1) в КС с зауженной горловиной (вариант 2) улучшена топливная экономич-

ность процесса, p_z уменьшено с 10,9 до 7,24 МПа, T_z снижена с 1887 до 1527 К при уменьшении дымности ОГ с 5...6 до 2,5...4,5 единицы по шкале дымометра Боша.

Уменьшение диаметра горловины КС до 20 мм позволило снизить 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 впрыскивания топлива 4...6 град п.к.в. до в.м.т.

Увеличения 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 в.м.т. 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 12, 8, 4 и 0 град п.к.в. до в.м.т. найдены оптимальные по параметрам g_e и дымности ОГ углы наклона боковой поверхности, равные 20...50 °С (варианты 2 и 11). Уровень содержания NO_x в ОГ при этом (угол опережения впрыскивания топлива 0 и 4 град п.к.в. до в.м.т.) был $(5...6) \cdot 10^{-4} \%$. При увеличении θ до 8 и 12° и оптимальных с точки зрения g_e и дымности ОГ углов наклона боковой стенки (20...50°) несколько возросло содержание NO_x в ОГ (в среднем на $2,5 \cdot 10^{-4} \%$) по сравнению с вариантами 10 и 12. Наихудшая из исследованных (варианты 14, а, б, в и з) — 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 θ до 0 град п.к.в. период задержки воспламенения не превышает 5 град п.к.в. За период задержки воспламенения в этом процессе подается небольшое количество топлива, чем достигается низкая 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.

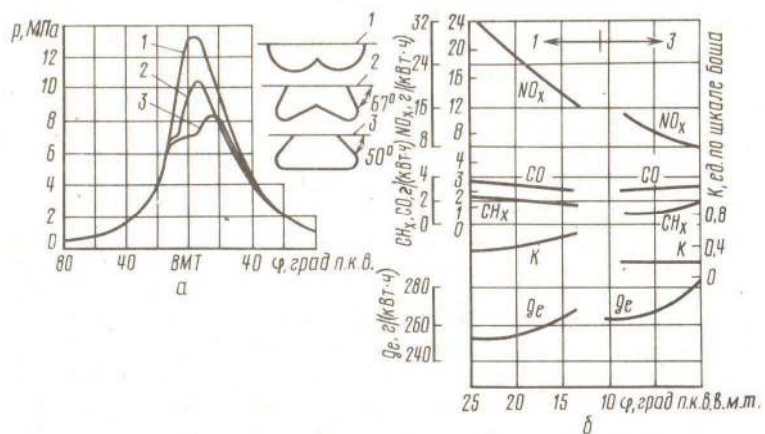


Рис. 22. Сравнительные характеристики дизеля Т6-3544 при работе с различными КС при полной нагрузке и $n = 2600$ мин⁻¹: а — индикаторные диаграммы; б — токсические характеристики; 1 — тороидальная КС; 2 — КС «Squisch Lip» первого поколения; 3 — КС «Squisch Lip» второго поколения

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 фирмы «Перкинс» токсичности и дымности ОГ в рабочих процессах дизелей в серийном исполнении и с 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 в.м.т. 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	26,9
Т6-3544 с открытой тороидальной КС	29,8	4,0	2,0	31,8

Дизель	Выброс вредных веществ, г/(кВт·ч)			
	NO _x	CO	CH _x	C
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 «Squisch Lip»), а экономичность соответственно 240 г/(кВт·ч) против 250 г/(кВт·ч). В случае применения КС первого поколения при сохранении дымности ОГ величина θ снижается до 10 град п.к.в. до в.м.т. вместо 25 град п.к.в. до в.м.т. 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 дизелей при применении КС второго поколения получено за счет ухудшения топливной экономичности до 270 г/(кВт·ч) при снижении p_z по 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 «Squisch Lip» обеспечивает снижение выброса NO_x с ОГ на 75 % при снижении p_z на 40 % и шума с 3 до 8 дБ.

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

Особенностью рабочего процесса «Duotherm», разработанного в Германии 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 поло-

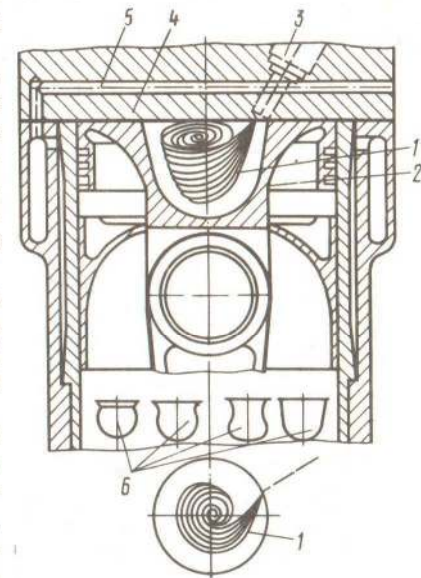


Рис. 23. Схема смесеобразования фирмы «Elko»:

1 — топливный факел; 2 — поршень с поверхностью скольжения в зоне выше уплотнительного пояса; 3 — форсунка; 4 — головка цилиндра; 5 — сверление для охлаждения форсунки; б — формы КС в поршне для процесса смесеобразования с однодырчатой форсункой

жении поршня в в.м.т. носок распылителя форсунки находится в зоне кромки КС. В КС организован интенсивный воздушный вихрь, который при взаимодействии с факелом впрыскиваемого топлива формирует в центре камеры топливоздушную смесь стехиометрического состава, окруженную оболочкой обедненной смеси. В варианте с турбонаддувом в этой оболочке находится до 30 % всего воздушного заряда. Сформированный в КС 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 обедненной 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 NO_x в ОГ (рис. 24, а).

Отсутствие топлива в холодных пристеночных слоях приводит к низкому содержанию CH_x в ОГ. Процесс отличается низкими дымностью, уровнем шума, улучшенной топливной экономичностью (рис. 24, б), хорошей приспособленностью к работе на альтернативных топливах.

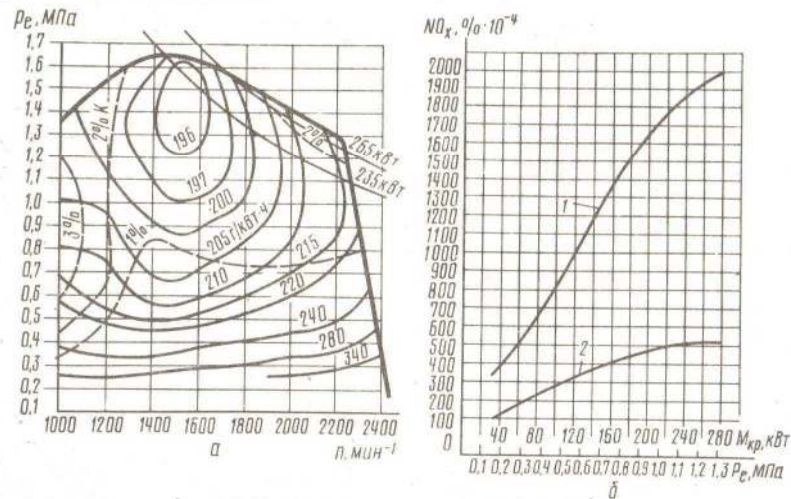


Рис. 24. Многопараметровая характеристика (а) и токсичность ОГ по NO_x (б) дизеля «Elko»:

1 — серийный дизель; 2 — малотоксичный дизель

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 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» с другими дизелями даны в таблице 17.

17. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДИЗЕЛЕЙ

Параметр	Фирма	
	«Volvo», «Rikardo»	«Elko»
Число цилиндров	3	3
iV_h , см ³	1279	1387
Диаметр поршня, мм	79	80
Ход поршня, мм	87	92
Максимальная мощность по DIN (при n , мин ⁻¹), кВт	39(4300)	66(4500)
Максимальный крутящий момент (при n , мин ⁻¹), Н·м	90(3420)	165(3000)
Степень сжатия ε	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_x — 0,138, NO_x — 0,724, частицы — 0,094 г/км.

Процесс, характеризующий тенденцию гомогенизации топливо-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

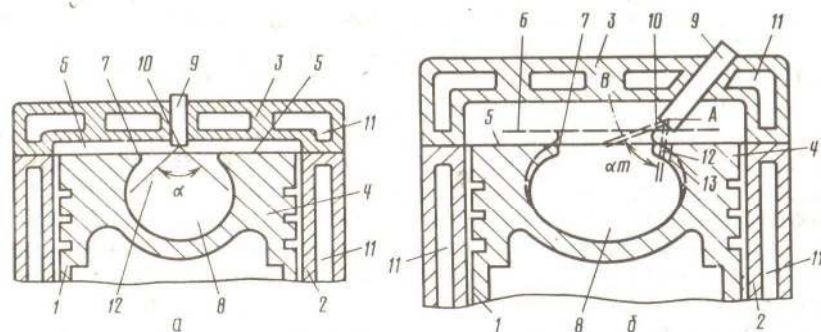


Рис. 25. Камера сгорания, реализующая объемный процесс смесеобразования с вертикальным (а) и наклонным (б) расположением форсунки:

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 — рубашка охлаждения; 12 — факел топлива; 13 — проточка в горловине

объеме КС, не соприкасаясь со стенками. Существуют варианты с центральным расположением форсунки 9 (рис. 25, а), установленной по оси цилиндра, и периферийной установкой 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 показатели токсичности и дымности 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, уменьшение 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

8851

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, дымности и токсичности, уровня вибрации и шума дизеля.

Осуществление раздельного 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 — 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 — применению 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 н.м.т. 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 успеет полностью испариться, и тогда образуется неоднородная по своему составу обедненная смесь и предварительных центров подготовки воспламенения топлива не возникнет.

Если 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 выпуска и в начале такта впуска — при этом значительная часть топлива удаляется из цилиндра вместе с ОГ в процессе такта выпуска, 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 в.м.т. (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: $q_{NO_{x,ог}} = 27,5$ г/(кВт·ч); $q_{CO_{ог}} = 1,2$ г/(кВт·ч); дымность ОГ — 41,5 % по шкале дымомера «Хартридж».

Для дизеля в малотоксичной комплектации: $q_{NO_{x,ог}} = 21,9$ г/(кВт·ч); $q_{CO_{ог}} = 3,6$ 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 12 дозатора, обеспечивая подачу меньшей порции топлива. При этом дополнительное отсечное окно 8 повернуто в сторону верхней торцевой дозирующей кромки 11 дозатора 10 и в отсечке предварительной дозы топлива не участвует (рис. 26, г и д); одно из распределительных окон 5 плунжера располагается напротив нагнетательного канала гильзы, а другое направлено в сторону глухой поверхности, обеспечивая нагнетание предварительной дозы топлива в первый цилиндр (рис. 26, е).

Для подачи предварительной дозы топлива во второй цилиндр плунжер 4 поворачивается на 90° , при этом взаимное расположение отсечных окон плунжера и торцовых 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 гильзы второго цилиндра, обеспечивая нагнетание топлива во второй цилиндр дизеля. Для подачи основной порции топлива в первый цилиндр плунжер 4 поворачивается на угол α по

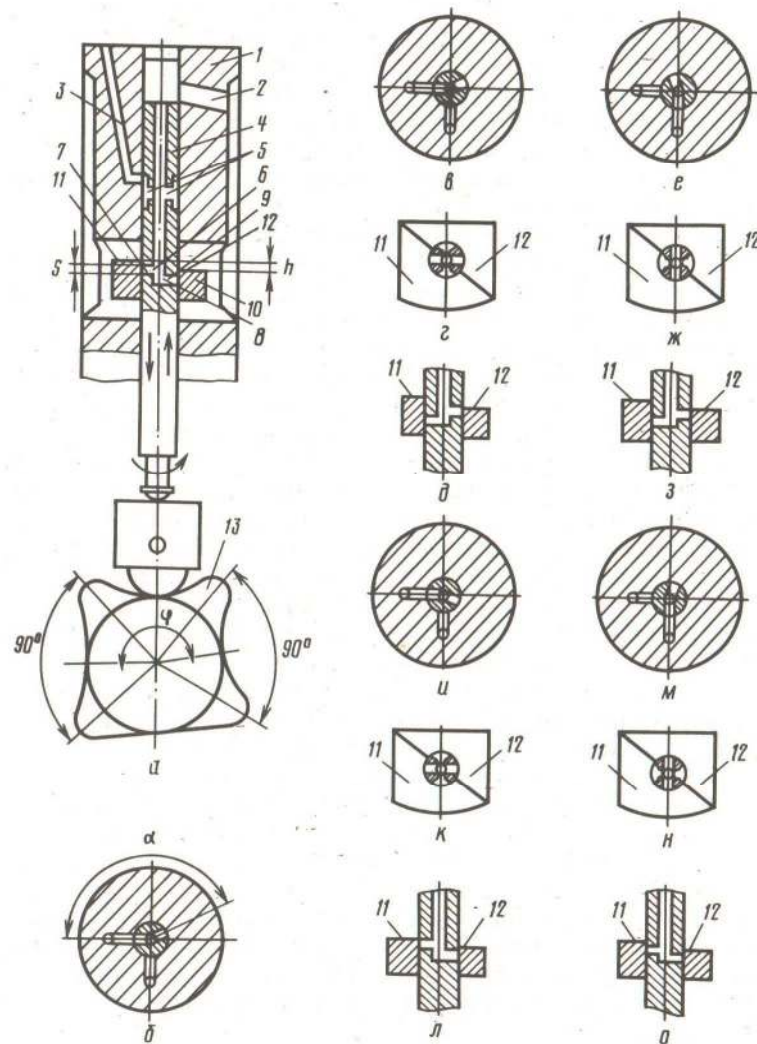


Рис. 26. Топливный распределительный насос двойной топливоподачи:
 а — различные стадии процесса топливоподачи: 1 — гильза; 2 — наполнительный канал; 3 — нагнетательный канал; 4 — плунжер; 5 — распределительные окна; 6 — отсечное окно; 7 — верхняя кромка; 8 — дополнительное отсечное окно; 9 — верхняя кромка дополнительного отсечного окна; 10 — дозатор; 11 — верхняя торцевая дозирующая кромка; 12 — нижняя торцевая дозирующая кромка; 13 — кулачковый вал

отношению к своему положению при подаче предварительной дозы топлива в первый цилиндр дизеля (α — 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 углом α 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 11 дозатора, а дополнительное отсечное окно 8 — в сторону нижней торцевой дозирующей кромки 12 дозатора (рис. 26, к и л), причем благодаря равной разности высот между верхней кромкой 7 основного отсечного окна и верхней кромкой 9 дополнительного отсечного окна 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 распределителя на седло и улучшение протекания конечной фазы впрыскивания.

Для подачи основной дозы топлива во второй цилиндр дизеля плунжер поворачивается на 90° , совмещая распределительное окно 5 плунжера 4 с нагнетательным каналом второго цилиндра гильзы (рис. 26, м). Взаимное расположение основного и дополнительного отсечных окон верхней и нижней торцевых 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 торцевыми дозирующими кромками дозатора, которая равна 0,75...0,95 максимального активного хода плунжера. При этом предварительная доза топлива равна 10...30 % максимальной цикловой подачи топлива. Углы α и φ для современных дизелей находятся в диапазоне 155...170°.

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...25° после в.м.т. такта выпуска, а угол опережения впрыскивания топлива равен 20...35° (12...25° по реальному впрыскиванию топлива в цилиндр) до в.м.т. такта сжатия. Следовательно, угол между основным и предварительным впрыскиванием по п.к.в. находится в диапазоне от 340 до 310°, а по насосу — от 170 до 155°.

Для дизеля Д-120, на котором была установлена система двойной топливоподачи при величине дополнительной порции топлива (~15 %), получено снижение оценочного выброса оксидов азота на 11 г/(кВт · ч), а дымность уменьшена на 15...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 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 холоднотопливном 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 впуск. 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, свидетельствуют 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 имеет место положительное влияние ионизационных токов на процесс сгорания и 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⁻¹ представлены на рисунке 27.

Индицирование проводилось при оптимальных равных секундных расходах дизельного и с подачей легкого топлива на впуске процессов на оптимальном для бензодизельного процесса установочном угле опережения 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

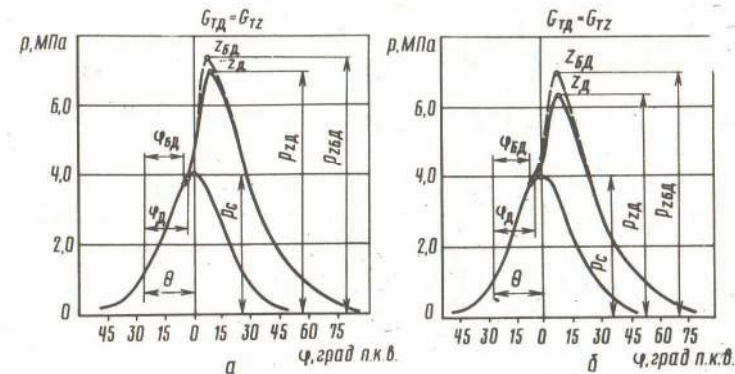


Рис. 27. Индикаторные диаграммы дизеля Д-21А1 (2Ч 10,5/12) при работе с подачей легкого топлива на впуске:
а — при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б — при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; — — — дизельный процесс; - - - с подачей легкого топлива на впуске

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 $dx/d\phi$ более плавная, продолжительность условного выгорания топлива сокращается.

При переходе на работу с подачей легкого топлива на впуске сокращаются максимальное значение $(dx/d\phi)_{\text{max}}$ и 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 предопределяет более эффективное

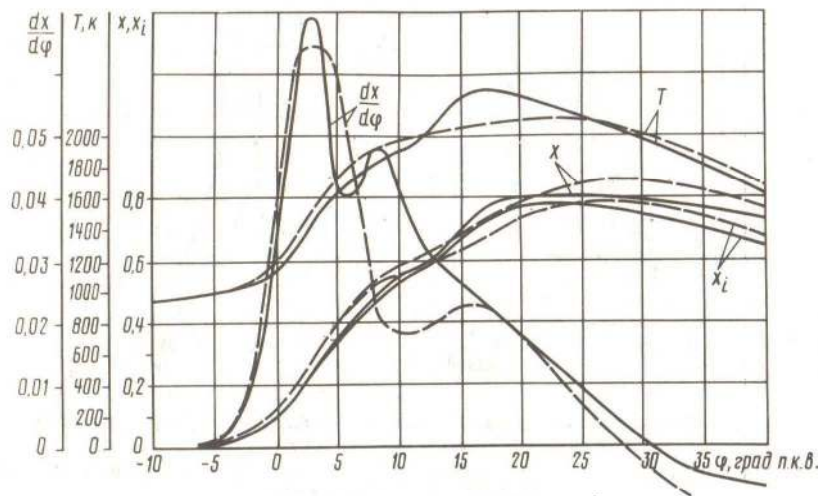


Рис. 28. Графики динамики выделения теплоты $\frac{dx}{d\varphi}$, усредненной температуры газов в цилиндре T , скорости отвода теплоты x и полезного выделения теплоты x_i в функции угла поворота коленчатого вала для $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; — дизельный процесс; - - - с подачей легкого топлива на впуске

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 легкого 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 вращения 1800 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 27,6 %. Анализ регулировочных и нагрузочных характеристик 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 NO_x . При этом необходимо учитывать, что уменьшается установочный угол опережения впрыскивания топлива, а это, в свою очередь, благоприятно влияет на снижение 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 NO_x снижается на всех режимах работы при подаче легкого топлива на впуске. На малых нагрузках эффект несколько выше. На номинальной нагрузке снижение содержания NO_x в ОГ составляет до 22 %. Увеличение содержания в отработавших газах CO_2 и CO 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 NO_x , как видно из графиков, снижается во всем диапазоне частот вращения, а наибольший эффект наблюдается при $n = 1700...2000 \text{ мин}^{-1}$.

Снижение содержания NO_x в ОГ дизеля при работе с подачей

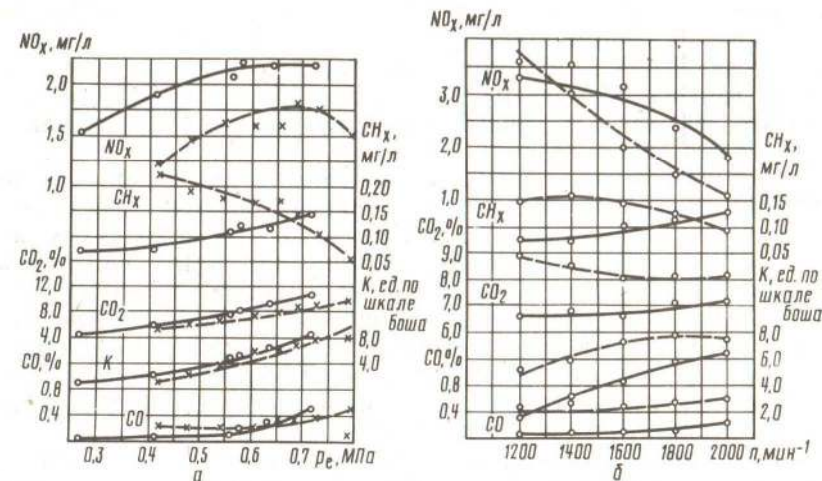


Рис. 29. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при подаче бензина на впуске в зависимости:

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

легкого топлива на впуске объясняется совместным эффектом от уменьшения установочного угла опережения 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 оказывает большое влияние на протекание процесса активного тепловыделения, что в значительной мере изменяет условия образования токсичных компонентов в ОГ (в первую очередь 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 стэнда на режиме номинальной мощности. Регулировка таким способом будет более качественной.

Исследования, посвященные износу дизелей при работе с подачей легкого топлива на впуске, показывают, что износ деталей ЦПГ не увеличивается. Содержание железа в масле при этом также 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

Показатель	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, $\text{мм}^2/\text{с}$	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 контрольными; 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

Показатель	Условия испытаний	
	Дизельный процесс ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$)	С подачей легкого топлива на впуске ($n = 1850 \text{ мин}^{-1}$)
Загрязненность ЦПГ, баллы	9,53	7,45
Износ деталей дизеля, г	1,36	1,20
Масса отложений в центрифуге, г	112,9	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 износ деталей равен или ниже износов деталей двигателей, работающих по дизельному процессу, снижаются расход масла на угар, загрязненность деталей ЦПГ, количество нагара на поршне, головке цилиндров и отложений в центрифуге.

Подача ДТ. На практике при работе 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 мин^{-1} и влияние подачи ДТ на впуске на содержание в ОГ NO_x и экономичность представлены на рисунке 30. Количество ДТ, подаваемого на впуск дизеля, задавалось в процентном отношении к расходу основного топлива, подаваемого насосом. Изменялись нагрузки дизеля и установочный угол опережения впрыскивания топлива. Из результатов экспериментов видно, что при заводской регулировке θ (17°) подача ДТ на впуске приводит к снижению NO_x в ОГ на 30...40 % при давлении до 0,38 МПа. При этом увеличение количества ДТ, подаваемого на впуск, более интенсивно снижает NO_x в ОГ. При подаче 30 % ДТ на впуск и 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 впрыскивания топлива приводит к снижению общего уровня концентрации NO_x в ОГ. При этом практического влияния на

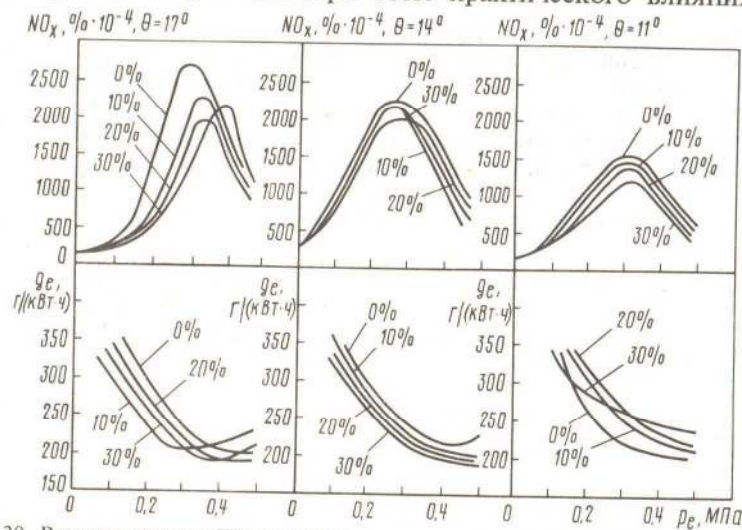


Рис. 30. Влияние подачи ДТ на впуске четырехтактного вихрекамерного дизеля на содержание оксидов азота в ОГ и удельный расход топлива

содержание NO_x в ОГ и удельный расход топлива подача ДТ на впуске не оказывает. Некоторое улучшение экономичности и снижение 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 ОГ NO_x . Уменьшение установочного угла опережения впрыскивания топлива до 11° п.к.в. приводит к дальнейшему снижению общего уровня концентрации NO_x в ОГ. Влияние подачи ДТ на впуске здесь весьма незначительно — уменьшение содержания NO_x в ОГ не превышает 18 %. Одновременно увеличивается удельный расход топлива.

При работе дизеля с подачей ДТ на впуске концентрации CH_4 и CO в ОГ возрастают в 2...3 раза, а сажи — практически не меняется.

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 отечественных тракторных двигателей работали с использованием воды.

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

Существует достаточное количество способов подачи воды в цилиндры ДВС, основные из которых представлены на рисунке 31. Наибольшее практическое применение нашли следующие

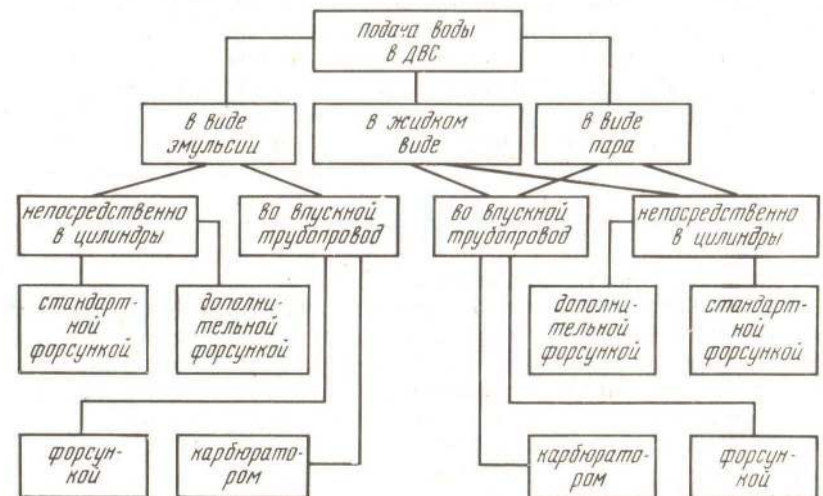


Рис. 31. Способы подачи воды в цилиндры ДВС

способы: подача водотопливной эмульсии (ВТЭ) с помощью стандартной топливной аппаратуры; подача воды во впускной трубопровод с помощью карбюратора и форсунки.

Подача ВТЭ. Использование ВТЭ не требует значительных конструктивных переделок дизеля, позволяет использовать известные 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 уменьшаются дымность и токсичность ОГ (до 60 %) при использовании эмульгированных топлив за счет снижения содержания СО и NO_x.

Водотопливные эмульсии представляют собой дисперсную систему, состоящую из капелек жидкости (дисперсной фазы), распределенных в другой жидкости (дисперсной среде). В дизелях применяют обратные эмульсии типа «вода в масле», которые исключают контакт металлических поверхностей топливной аппаратуры и стенок трубопроводов с ВТЭ. В состав эмульсии для облегчения образования и повышения стабильности добавляют ПАВ — 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.

Важный показатель качества ВТЭ — 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 капель 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 ее агрегативная стабильность снижается. Низкие же температуры, наоборот, не оказывают на стабильность ВТЭ заметного влияния.

Дисперсность ВТЭ определяется размерами капель дисперсной фазы (воды). Чем меньше размеры капель 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 ее плотность и вязкость возрастают, поверхностное натяжение увеличивается, температура застывания и вспышки повышается, теплотворная способность снижается, а показатели токсичности и дымности дизелей улучшаются.

Установки для получения ВТЭ должны быть просты и надежны. Для этой цели применяют механические мешалки, коллоидные мельницы, струйные диспергаторы, барботажные, ультразвуковые и кавитационные установки, гомогенизаторы. Каждая из перечисленных установок позволяет получить ВТЭ достаточной дисперсности, хотя размеры частиц различны. Так, коллоидные мельницы приготавливают 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 температурами поверхности топлива и 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 разрушат поверхность капли, т. е. наступит микрорыв. Капля дробится, ее частицы интенсивно испаряются и перемешиваются, процесс интенсифицируется. 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 Я. Б. Зельдовичу, скорость образования оксида углерода пропор-

циональна 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 NO_x в ОГ.

Вода разбавляет горючую смесь, уменьшая тем самым относительную концентрацию кислорода, что также благоприятно влияет на снижение содержания NO_x в ОГ.

На рисунке 32, а показана схема дозирования компонентов и приготовления ВТЭ высокой концентрации, а на рисунке 32, б — результаты изменения параметров дизеля 1СН 16/17 в зависимости от содержания воды в ВТЭ [27] (для приготовления ВТЭ применялся механический диспергатор с частотой вращения 2000...3000 мин⁻¹). Благодаря применению эффективных стабилизаторов удалось получать эмульсии с агрегативной стабильностью до 50 сут, кинетической — до 2 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 в ВТЭ до 40...45 % по массе удается обеспечить снижение содержания в ОГ

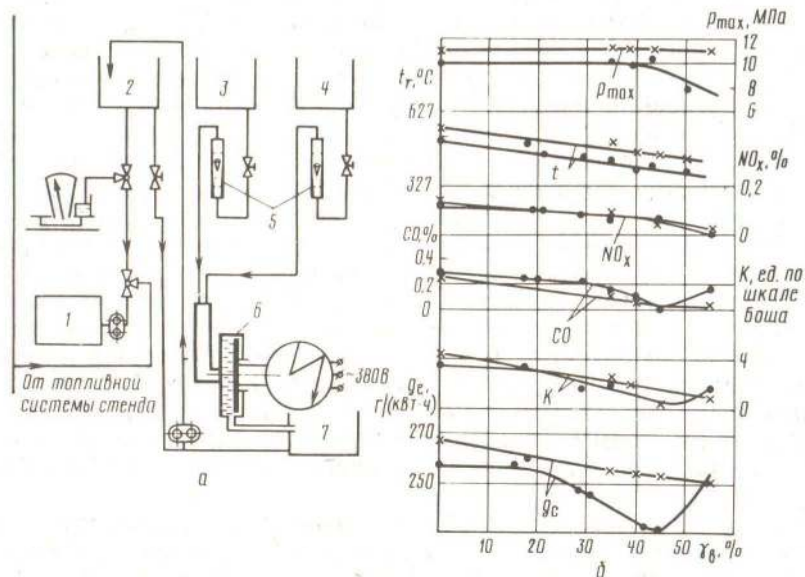


Рис. 32. Применение ВТЭ:

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 1СН 16/17 в зависимости от содержания воды в ВТЭ: • — $p_e = 43,7 \text{ кВт}$, $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; x — $p_e = 59 \text{ кВт}$, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

CO в 5...8 раз, сажи — более чем в 10 раз, NO_x — в 6...8 раз; удельного эффективного расхода топлива — на 15...18 г/(кВт · 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 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 NO_x в ОГ связано с уменьшением 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 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 раза и более 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 сжатая 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, образующиеся как продукты горения, продолжают концентрацию активных центров, влияют на кинетику превращения промежуточных активных центров, промежуточных продуктов окисления и ход реакции с участием стенки цилиндра, что не может не влиять на образование токсичных компонентов в ОГ.

Индицирование тракторного дизеля Д-21А1 (2Ч 10, 5/12) [28] показало, что при подаче воды до 100 % к расходу ДТ не изменяются период задержки воспламенения (рис. 33), характер кривой давления и максимальное давление газов в цилиндре. 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 инициирования процесса сгорания углеводородного топлива при возросшем числе диссоциированных молекул воды, подаваемой на впуске дизеля.

Из графиков на рисунке 34 видно, что $(dx/d\varphi)_{\max}$ дизельного процесса несколько выше $(dx/d\varphi)_{\max}$ с подачей воды до 100 %. При увеличении подачи воды до 200 % к расходу основного

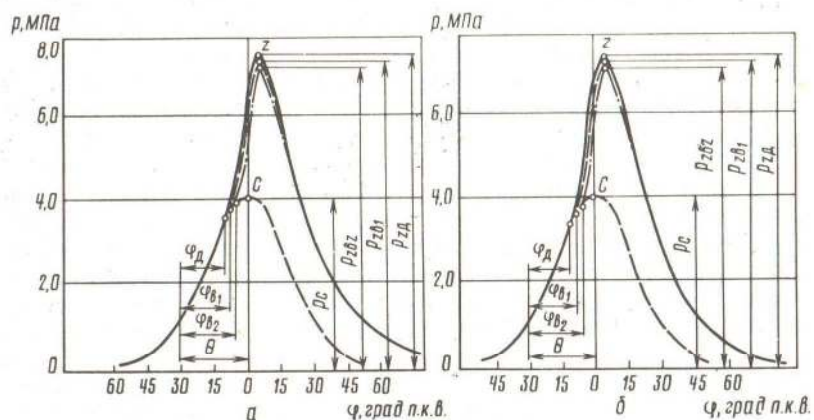


Рис. 33. Индикаторные диаграммы дизеля Д-21А1:
а — при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б — при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; — — — дизельный процесс; - - - - подача 150 % воды к расходу основного топлива; - · - · - · — подача 200 % воды к расходу основного топлива

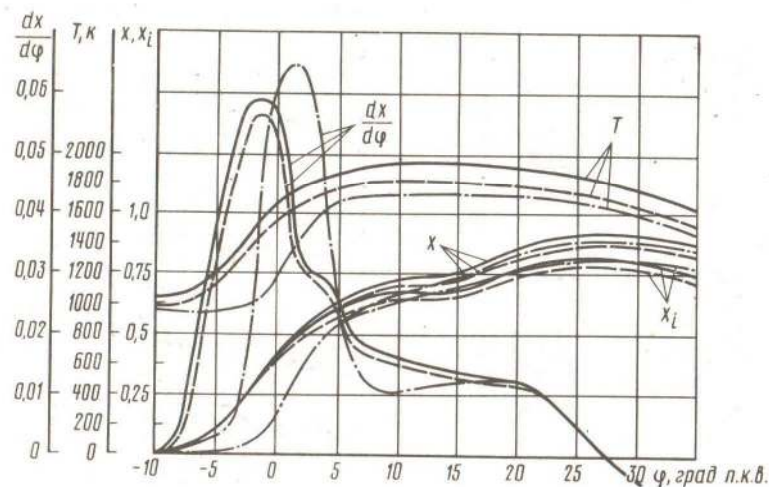


Рис. 34. Графики динамики выделения теплоты dx , усредненной температуры газов в цилиндре T , скорости отвода теплоты x и полезного выделения теплоты x_L в функции угла поворота коленчатого вала для $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$: — — — дизельный процесс; - - - - подача 100 % воды к расходу основного топлива; - · - · - · — подача 200 % воды к расходу основного топлива

топлива $(dx/d\varphi)_{\max}$ значительно возрастает по сравнению с дизельным процессом и сдвигается вправо от в.м.т., 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 оптимальная подача воды на впуске дизелей должна составлять 50...100 % к расходу ДТ. Снижение температуры газов в цилиндре, стенок цилиндров не может не отразиться на процессе образования NO_x , имеющем термическую природу, поскольку содержание NO_x (в основном NO) растет в зависимости

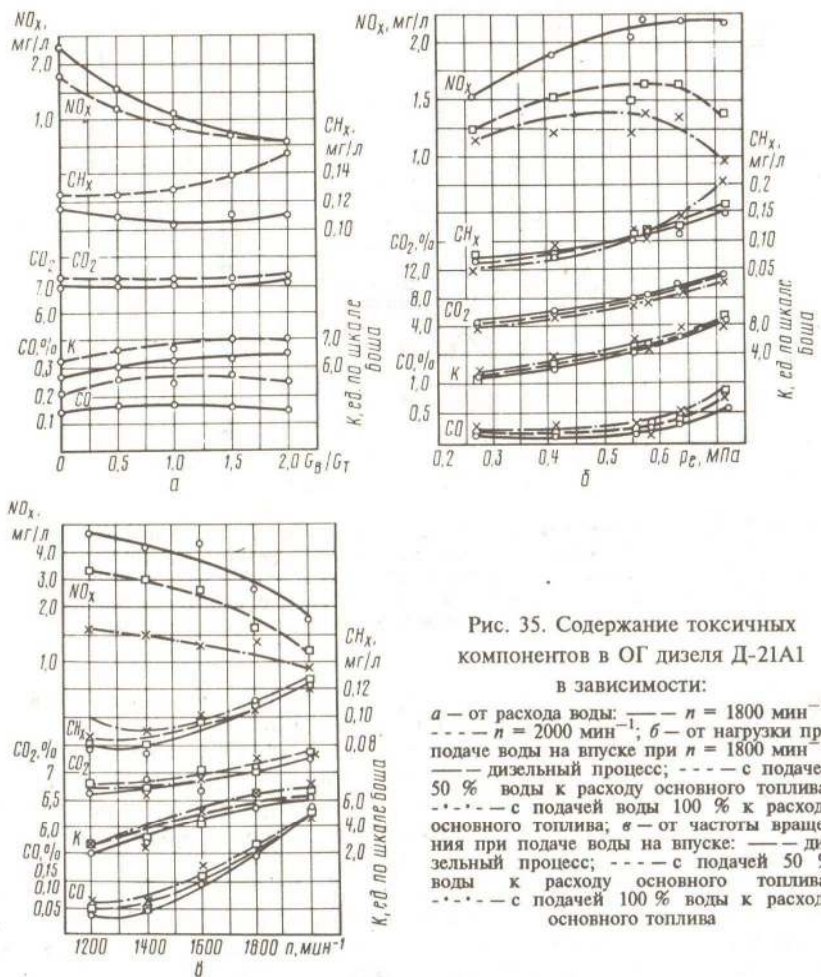


Рис. 35. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 в зависимости:

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

от температуры по экспоненциальной зависимости. Для гетерогенного горения, наблюдающегося в цилиндрах дизеля, существенное значение приобретают 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» NO_x в цилиндре.

Зависимость содержания NO_x, CO, CH_x, CO₂ и К в функции расхода воды при подаче ее во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 показана на рисунке 35, а. Количество подаваемой воды изменялось от 0 до 200 % ($G_v/G_T = 2,0$).

Наиболее существенное влияние подача воды оказывает на содержание NO_x в ОГ. Снижение содержания NO_x при подаче воды 100 и 200 % к расходу ДТ наблюдается в 2 и 4 раза соответственно по сравнению с дизельным процессом при частоте вращения 1800 мин⁻¹; при 2000 мин⁻¹ закономерность снижения NO_x в ОГ с увеличением количества подаваемой воды также сохраняется. При этом наблюдается незначительный рост содержания CH_x, CO и К. Влияние подачи воды в цилиндры дизеля сказывается на содержании NO_x в ОГ во всем диапазоне нагрузок, 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 NO_x в ОГ заметно снижается. Анализ результатов показывает, что основное количество NO_x образуется в цилиндре дизеля в период так называемого быстрого сгорания, что во многом определяет место и время их образования. Образование NO_x на малых нагрузках дизеля при средней максимальной температуре цикла менее 1300...1500 °С связано с наличием повышенных локальных температур в области сгорания капелек топлива. Наличие локальных температур, выравниваемых по объему цилиндра со скоростью звука в областях гетерогенного сгорания, и определяет уровень образования NO_x на малых нагрузках. Дальнейшее повышение содержания NO_x по мере возрастания нагрузки до средних значений связано с увеличением локальных температур и особенно с временем их существования.

При работе дизеля на нагрузках, близких к максимальным, образование NO_x сокращается вследствие возрастающего дефицита кислорода при изменении α . При подаче воды в цилиндры дизеля средняя температура цикла уменьшается на 200 °С. Это вызывает снижение содержания NO_x в ОГ на всех нагрузках, хотя характер кривых 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 показано на рисунке 35, в, из которого видно, что количество подаваемой воды на впуске снижает содержание NO_x в ОГ во всем диапазоне частот вращения, причем наибольший эффект наблюдается на малых частотах вращения (1200...1400 мин⁻¹). При увеличении частоты вращения эффект от подачи воды уменьшается. Снижение температуры стенок цилиндра и холодного пристеночного слоя приводит к дополнительному образованию CO, CH_x. Анализ мощностных и экономических показателей работы дизеля Д-21А1 при подаче воды во впускной трубопровод показывает, что снижаются температура ОГ на 20...40 °С, коэффициенты η_V и α . Мощностные показатели остаются на уровне дизельного процесса.

Технические вопросы по созданию устройства для подачи воды

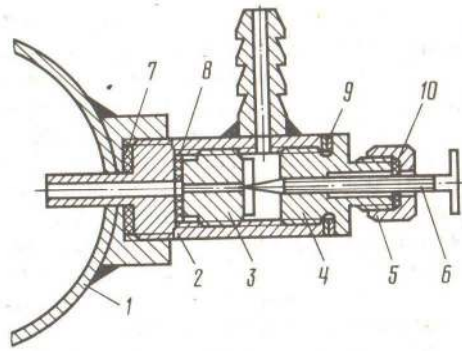


Рис. 36. Схема беспоплавкового карбюратора для подачи воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 трактора Т-25А:

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

во впускной трубопровод могут решаться различными путями с учетом поставленных задач, а также количества подаваемой воды и необходимости создания специальных средств, 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) для дизеля Д-21А1 трактора Т-25А, так и усовершенствованная конструкция, включающая в себя устройства, прекращающие подачу воды в карбюратор при понижении температуры

охлаждающей жидкости ниже допустимой, а также осуществляющие автоматическое включение и выключение при пуске и останове дизеля ЯМЗ-240 самосвала БелАЗ-540А (рис. 37). Обе системы прошли эксплуатационные испытания [28].

Система с беспоплавковым карбюратором включается в работу после прогрева двигателя. Регулировочной иглой 6 (см. рис. 36) устанавливают расход воды, равный часовому расходу топлива. Дальнейшая работа заключается в подключении карбюратора к баку для воды в начале работы и отключении в конце работы за 10...15 мин до остановки двигателя. Представляют интерес данные по снижению содержания NO_x в ОГ дизеля Д-21А1 с системой подачи воды во впускной трубопровод при эксплуатации его на животноводческом комплексе.

Замеры проводили в воздухе рабочей зоны коровника, в зоне выброса ОГ трактора на расстоянии 1,5 м от обреза выпускной трубы. Воздух анализировался на содержание NO_x и СО экспресс-методом. Пробы воздуха определялись до прохода трактора, при работе трактора по дизельному процессу и при работе с подачей воды во впускной трубопровод. Из результатов эксперимента, представленных в таблице 20, видно, что еще до прохода трактора в воздухе животноводческой фермы находится значительное количество NO_x . После прохода трактора содержание NO_x в воздухе резко возрастает. После прохода трактора с подачей воды содержание NO_x в воздухе рабочей зоны снижается на 13...40 %, содержание СО остается на том же уровне.

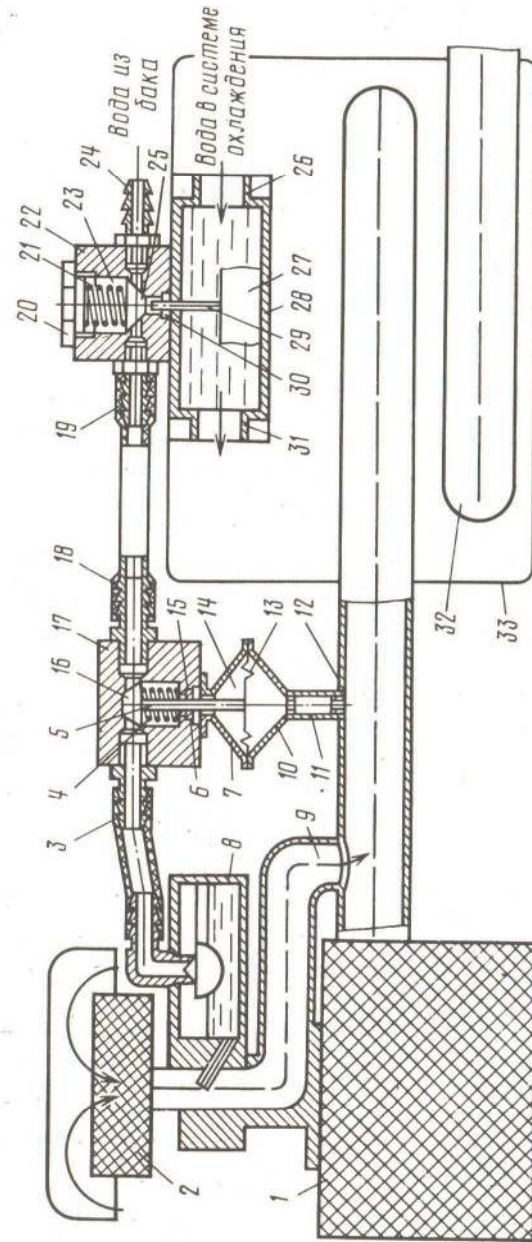


Рис. 37. Схема системы подачи воды во впускной трубопровод дизеля ЯМЗ-240 самосвала БелАЗ-540А:

1 — воздухоочиститель; 2 — воздушный фильтр; 3, 18, 19 и 24 — шпунтеры; 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 — корпуса; 11 — трубка; 12 — впускной трубопровод; 13 — мембрана; 14 — вакуумный агрегат; 15 — уплотнение; 16 и 25 — клапаны; 20 — болт; 23 — термостатическое устройство; 27 — термостат; 32 — впускной трубопровод; 33 — дизель

20. ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ ВОДЫ ВО ВПУСКНОЙ ТРУБОПРОВОД ДИЗЕЛЯ ТРАКТОРА Т-25А НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ (МГ/М³) ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЕГО НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Условия опыта	Компонент	Точка замера				
		1	2	3	4	5
До прохода трактора	NO _x	3,1	2,7	2,05	2,05	2,25
	CO	—	—	—	—	—
После прохода трактора	NO _x	30,8	41,0	36,95	36,95	32,85
	CO	43,7	35,0	43,7	25,0	43,7
После прохода трактора с подачей воды во впускной трубопровод дизеля	NO _x	22,55	30,8	22,55	22,55	28,7
	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 (см. 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 трубопровод 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 клапан 25, поднимаясь, увеличивает про-

ходное 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 содержания NO_x в ОГ в зависимости от относительного времени ездки представлены на рисунке 38. При подаче воды во впускной трубопровод температура ОГ снижается на 20...50°, а выделение NO_x уменьшается в среднем на 30 %. Нарботка пяти автосамосвалов с такой системой подачи воды составила от 5000 до 20 000 км пробега. Проведенный на трех двигателях микрометраж деталей ЦПГ при пробеге от 12 000 до 20 000 км ухудшения 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 во впускной трубопровод. Результаты спектрального анализа картерного масла дизелей при работе с подачей воды на впуске и без нее представлены на рисунке 39, а. Из графиков

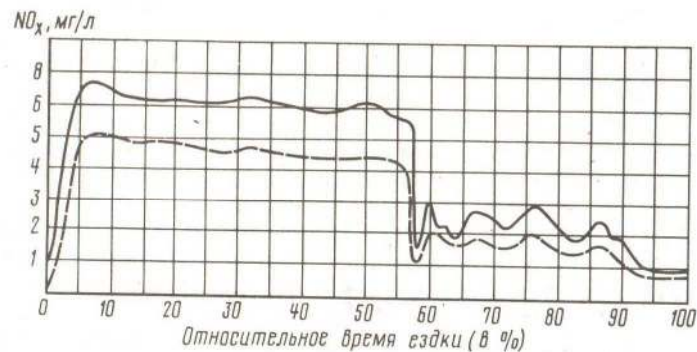


Рис. 38. Содержание NO_x в ОГ дизеля ЯМЗ-240 автомобиля БелАЗ-540А при эксплуатационных испытаниях: — без подачи воды; - - - с подачей воды

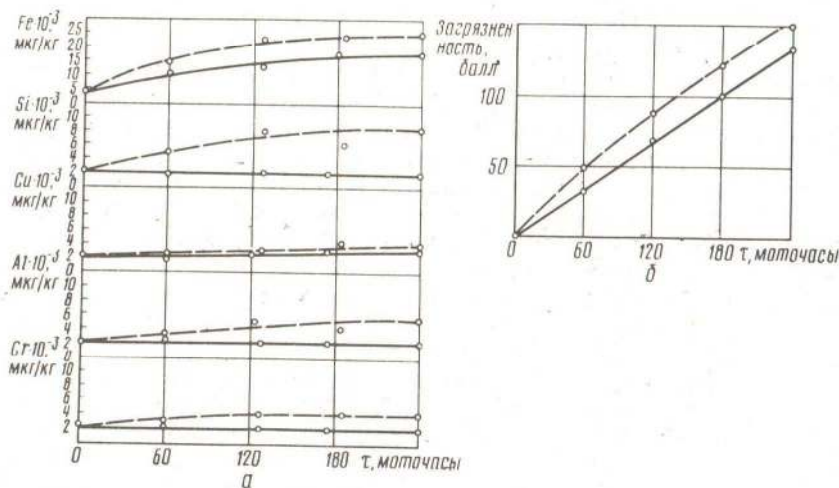


Рис. 39. Показатели работы дизеля трактора Т-25А:

а — результаты спектрального анализа масла в зависимости от наработки при эксплуатационных испытаниях: — дизельный процесс; - - - с подачей воды на впуске; б — загрязненность масла при работе: — дизельный процесс; - - - с подачей воды на впуске

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 его 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

Ст содержание их 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 вязкость 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 отложений, 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 (КН), термических и жидкостных (ЖН) 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 сжигание продуктов неполного сгорания топлива, поступающих в систему выпуска из цилиндров. Для догорания CO , C_xH_x , RCNO и других продуктов неполного сгорания до конечных безвредных продуктов (CO_2 и H_2O) в термическом нейтрализаторе устанавливают реакционную камеру, температура ОГ в которой должна быть $650...850$ °С. 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 посторон-

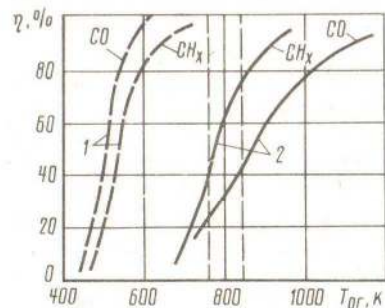


Рис. 40. Сравнение окисления CO и CH_x каталитическим и термическим нейтрализаторами:

1 — каталитический нейтрализатор; 2 — термический нейтрализатор

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 КН. Так, догорание CO на поверхности катализатора идет по реакции



В результате реакций догорания CO и продуктов неполного сгорания топлива (как в случае очистки ОГ с помощью термических нейтрализаторов) образуются конечные безвредные продукты сгорания — CO₂ и H₂O. Перечисленные реакции являются окислительными, эффективность их в определяющей степени зависит от температуры ОГ (см. рис. 40).

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 CO, CH_x и RCHO можно представить в виде пяти отдельных стадий, условно проходящих в такой последовательности: диффузия CO, CH_x и RCHO из потока ОГ к поверхности зерна катализатора и внутри пор, имеющихся в зерне; активная адсорбция CO, CH_x и RCHO (хемосорбция) на поверхности катализатора с образованием промежуточных поверхностных соединений реагент — катализатор;

него источника. В дизелях для сгорания CO, CH_x, 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 CO требуются более высокие температуры, чем для окисления CH_x. Эффективность процесса сгорания вредных веществ в термическом нейтрализаторе определяется его рабочей температурой, величиной избыточного кислорода в ОГ, интенсивностью перемешивания ОГ в

перегруппировка атомов исходных компонентов ОГ с образованием промежуточного соединения продукт — катализатор; десорбция продукта ОГ (CO₂, H₂O) 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-Каме-нецким, в переходной области работы катализатора зависимость его эффективности от температуры газа при фиксированной объемной скорости имеет вид S-образной кривой. Для повышения эффективности очистки ОГ от CO, CH_x и RCHO необходимо, чтобы процесс каталитической очистки дизельных ОГ проходил в области внешней диффузии т. е. при температуре ОГ выше 300 °С.

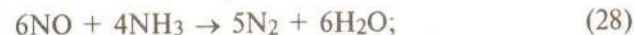
Восстановительные катализаторы применяют для очистки ОГ дизелей от NO_x. Селективное восстановление NO_x может происходить при добавлении в ОГ таких газообразных реагентов, как H₂, CO, NH₃. При использовании CO осуществляются реакции типа



и



Восстановление NO аммиаком идет по реакциям, происходящим при 200...300 °С,



Возможно также неселективное восстановление NO_x за счет добавления в ОГ метана (CH₄), протекающее при температуре ОГ 350...450 °С по реакциям



и



Недостатки перечисленных процессов восстановления NO_x: сложность регулирования относительно узкого диапазона температур ОГ, при которых осуществляются реакции восстановления, а также то, что непрореагировавшие CO, NH₃, CH₄ и другие добавки сами являются дополнительными загрязнителями атмосферы. По этой причине восстановительные процессы нашли очень ограниченное применение для очистки ОГ дизелей.

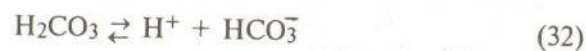
При жидкостной очистке отдельных компонентов ОГ дизелей состоят из трех групп веществ: мелкодисперсных частиц (сажа, смолистые вещества, пары воды и т. д.), растворимых в воде компонентов (NO_2 , SO_2 , H_2 , CO_2 , RCHO и т. д.) и плохо растворимых и нерастворимых в воде компонентов (NO , CO , CH_x и т. д.), что определяет диапазон действия ЖН, очищающих ОГ от NO_2 , SO_2 , H_2S , CO_2 , сажи, смолистых веществ и 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.

Вторая стадия — адсорбция — 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).

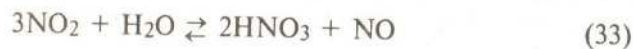
Третья стадия — конденсация и фильтрация — наблюдается в ЖН при снижении температуры ОГ ниже критической температуры рассматриваемого компонента (в случае насыщенных паров этого компонента), коагуляции (слипания жидких и твердых частиц ОГ) и дальнейшем их задержании с помощью фильтров.

Рассмотрим реакции, по которым протекает поглощение основных токсичных компонентов ОГ. Растворение CO_2 сопровождается диссоциацией образующейся H_2CO_3 по уравнению

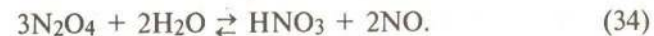


При растворении CO_2 в растворах едких щелочей (MOH) наблюдается химическая адсорбция, которая протекает с большой скоростью до тех пор, пока вся щелочь не перейдет в карбонат (H_2CO_3). Поглотительная способность щелочного раствора по отношению к CO_2 очень велика. SO_2 аналогично едким щелочам (например, NaOH) вначале образует сульфат (Na_2SO_3), а затем бисульфат (NaHSO_3). Вместо едких щелочей в ЖН иногда используют растворы карбонатов (например, Na_2CO_3). Заметное параметрическое давление SO_2 над раствором обнаруживается тогда, когда все основание переведено в сульфат и присутствуют ионы HSO_3^- .

Взаимодействие NO_2 и N_2O_4 с водой протекает по реакции



или по реакции



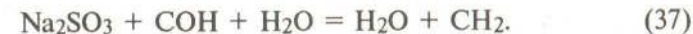
При адсорбции NO_2 щелочами образуются эквимолекулярные количества нитрита и нитрата.



Эквимолекулярная смесь $\text{NO} + \text{NO}_2$ ведет себя при адсорбции как N_2O_3 , и реакция следует по уравнению



Оксид азота в воде практически нерастворим. 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 сернистокислого натрия (Na_2SO_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 поглощается до 90 % альдегидов (RCOH), а уменьшение поглотительной способности раствора с увеличением связанных альдегидов не так велико, как в чистой воде. Гидрохинон добавляют для увеличения срока действия сернистокислого 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 ЖН).

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. Применяют 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 поверхности фильтра для понижения температуры воспламенения частиц также 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 КН и ЖН, обеспечивающие определенное улучшение гигиенических характеристик дизелей. Это частично связано с тем, что правилами Госгортехнадзора при эксплуатации дизельного оборудования в условиях с ограниченным воздухообменом применение КН и ЖН предусмотрено в обязательном порядке. В то же время применение этих устройств не обеспечивает снижения концентрации NO_x в ОГ дизелей.

Ряд адсорбентов (цеолиты) позволяет значительно очистить ОГ от NO_x, однако для обеспечения процесса необходимо обезвоживание ОГ и снижение их температуры до 20...30 °С. Для этого необходима установка в выпускной системе дизеля очень сложной, дорогой и металлоемкой системы, требующей трудоемкого обслуживания

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	Ограни-чения к приме-нению	Рекомен-дуемые области приме-нения	
	NO _x	С	СО	СН _x	RHCO	SO _x	Бенз(а)-пирен					За-пах
Тип рабочего процес-са (М, FM, Н и т. д.)	У/2...4	У/2...3	У/2	У/2	НИ	НИ	—	У	В	Внед-рен	Нет ограничений	То же
Разделенная КС	У/2...3	У/2...3	У/2...3	У/2...3	НИ	НИ	—	У	В	То же	То же	То же
Технологические осо-бенности	НВ	У/1,5	НУ	НУ	—	НИ	—	У	НИ	»	»	»
Совершенствование систем выпуска и вы-пуска топливной ап-паратуры	НИ	У/1,6	НУ	У/1,3...1,5	—	НИ	—	У	НУ	»	»	»
Степень сжатия, форма КС	У/1,3...2	У/2	У/1,5...2	У/1,5...2	НВ	НИ	—	У	В	Испы-тания	—	»
Уменьшение макси-мальной цикловой подачи**	НИ	У/2...3	У/2...3	У/2...3	В	—	—	У	НИ	Внед-рен	Нет ограничений	То же
Уменьшение угла опережения впрыс-кивания топлива	У/1,5...2	В/1,5	НИ	В/1,3	—	—	—	—	В	То же	То же	То же
Регулировка фаз га-зораспределения	У/1,2...1,5	У	У	У	—	—	—	У	НВ	»	»	»
Регулировка парамет-ров топливной аппа-ратуры	НИ	У/1,5	У/1,5	У/1,5	—	—	—	У	У	»	»	»

Малотоксичные рабочие процессы

Регулировка топливной аппаратуры

Методы и средства снижения токсичности ОГ дизелей	Токсичные компоненты ОГ										Эко-но-мич-ность*	Уро-вень разра-ботки	Ограни-чения к приме-нению	Рекомен-дуемые области приме-нения
	NOx	C	CO	CHx	RHCO	SOx	Бенз(а)-пирен	За-пах						
	У	У	У	У	У	У	У	У						
Рециркуляция ОГ	$\frac{Y}{2}$ 2...5	У	У	У	У	У	У	У	У	У	НВ	Внед-рен	Отсутствие надежных систем управления	Нет
Впрыск воды, приме-нение ВТЭ	$\frac{Y}{1,3...2}$	$\frac{Y}{1,3}$	$\frac{B}{1,5}$	$\frac{B}{1,3}$	—	—	—	$\frac{B}{1,5...3}$	—	—	НИ	То же	Замерзание воды при отрица-тельных темпе-ратурах	При положительных темпе-ратурах
Надув***	$\frac{Y}{2}$	$\frac{Y}{2}$	$\frac{Y}{2}$	$\frac{Y}{2}$	—	—	—	—	—	—	НУ	—	Нет	Нет
Обогащение воздуха на впуске жидким и газообразным топли-вом	НУ	$\frac{Y}{1,5...2}$	$\frac{B}{1,5}$	$\frac{B}{1,5}$	—	—	—	—	—	—	У	Испы-тания	Нет	Нет
Двойная топливно-посадка	$\frac{Y}{1,5...2}$	$\frac{Y}{1,5...2}$	$\frac{Y}{1,5}$	$\frac{Y}{1,5}$	—	—	—	—	—	—	НИ	То же	—	—
Жидкостный нейтра-лизатор	$\frac{Y}{1,1}$	$\frac{Y}{1,5...4}$	НИ	$\frac{Y}{2...3}$	$\frac{Y}{2...5}$	$\frac{Y}{2...10}$	$\frac{Y}{2...10}$	$\frac{Y}{2...10}$	$\frac{Y}{2...10}$	$\frac{Y}{2...10}$	НИ	Внед-рен	Ограни-чение при ра-боте при отрица-тельной темпе-ратуре	При положительной темпе-ратуре

Очистка отработавших газов

1983

Каталитический ней-трализатор	НИ	$\frac{Y}{1...10}$	$\frac{Y}{3...10}$	$\frac{Y}{3...10}$	НИ	НИ	У	У	У	НИ	То же	Нет	Нет
Фильтры	НИ	$\frac{Y}{2...15}$	НИ	НИ	НИ	$\frac{Y}{1,5...4}$	—	—	—	НИ	—	То же	То же
Адсорберы	$\frac{Y}{2...15}$	$\frac{Y}{2...15}$	—	У	У	$\frac{Y}{2...15}$	—	—	—	НИ	Испы-тания	—	—
Антидымные присад-ки	НИ	$\frac{Y}{2...3}$	НИ	НИ	НИ	—	—	—	—	НИ	Испы-тания	Нет	Нет
Техническое обслу-живание и ремонт двигателя	НВ	$\frac{Y}{1,5}$	$\frac{Y}{1,5}$	$\frac{Y}{1,5}$	НУ	$\frac{Y}{1,5}$	—	—	—	НУ	Внед-рен	Нет	Нет
Увеличение темпера-туры впускного воз-духа	НВ	$\frac{Y}{1,4}$	$\frac{Y}{1,4}$	$\frac{Y}{1,4}$	НУ	$\frac{Y}{1,4}$	—	—	—	НУ	Испы-тания	—	—
Увеличение темпера-туры стенок КС	НВ	$\frac{Y}{1,4}$	$\frac{Y}{1,4}$	$\frac{Y}{1,4}$	НУ	$\frac{Y}{1,4}$	—	—	—	НУ	То же	—	—
Использование раз-личных топлив	НУ	$\frac{Y}{1,5}$	$\frac{Y}{1,5}$	У	НУ	У	—	—	—	НИ	—	—	—

Другие методы

* Величина, обратно пропорциональная удельному расходу топлива.

** Уменьшение мощности двигателя.

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

ния. В результате использование цеолитов для очистки ОГ практического применения не нашло. Поэтому наиболее эффективно 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 ТО 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 ее 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 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 2000 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 ТО 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, применяемые в ССТ, должны быть унифицированы.

Система снижения токсичности не должна ухудшать обзор водителю, создавать препятствия для ТО 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 CH_x и CO , до 90 %.

Тракторы и автомобили, оснащенные термическими дожигателями, обладают хорошими эксплуатационными качествами. Термические дожигатели могут быть долговечными, однако отсутствие места установки и особенности конструкции некоторых двигателей огра-

ничивают их применение. Достигнуты успехи в подборе 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 температурам от 850 до 1000 °С, наблюдающимся в реакторе. Наиболее подходящие материалы в этом смысле — нержавеющие жаростойкие стали. 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 противодействия 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 КН обладают явными эксплуатационными преимуществами: большой долговечностью, 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 дожигателя; 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 движения 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 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 СО и СН_х. Для снижения выброса

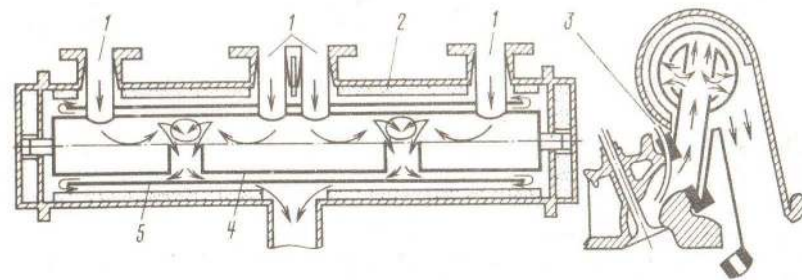


Рис. 41. Схема конструкции термического реактора:

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

NO_x 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 применяют только для очистки ОГ от СО, СН_х и РСНО.

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 СО, СН_х, РСНО. Эффективность очистки ОГ от этих компонентов колеблется, как правило, от 70 до 100 %. В странах СНГ 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 СО и СН_х, имели недостаточный ресурс.

Для повышения ресурса в нейтрализаторе 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.

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

Для плоских реакторов разрушение гранул катализатора в 3...6

раз меньше по сравнению с цилиндрическими. 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 при различных относительных удлинениях внешней и внутренней решеток реактора при резких сменах температур ОГ, а также при «закусывании» 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 СН_x , содержащихся в ОГ дизеля Д-160, установленного на тракторе Т-130М.

Нейтрализатор Н-46А2 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 концентрических 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

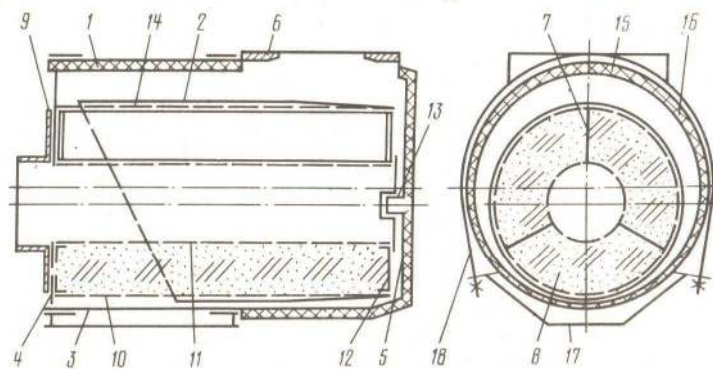


Рис. 42. Каталитический нейтрализатор Н-46А2

дна. Внутренняя решетка реактора свободно расположена в цилиндрических гнездах 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 его замена или регенерация. Учитывая высокую стоимость алюмоплатиновых катализаторов, дефицит металлов платиновой группы и постоянно возрастающий спрос на КН, целесообразно регенерировать катализаторы, а не менять.

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 КН 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 снижают время разогрева КН при холодных пусках, что является само по себе важным положительным качеством.

Геометрическая форма и структура каталитического носителя также играют важную роль в выборе конструкции КН. Существу-

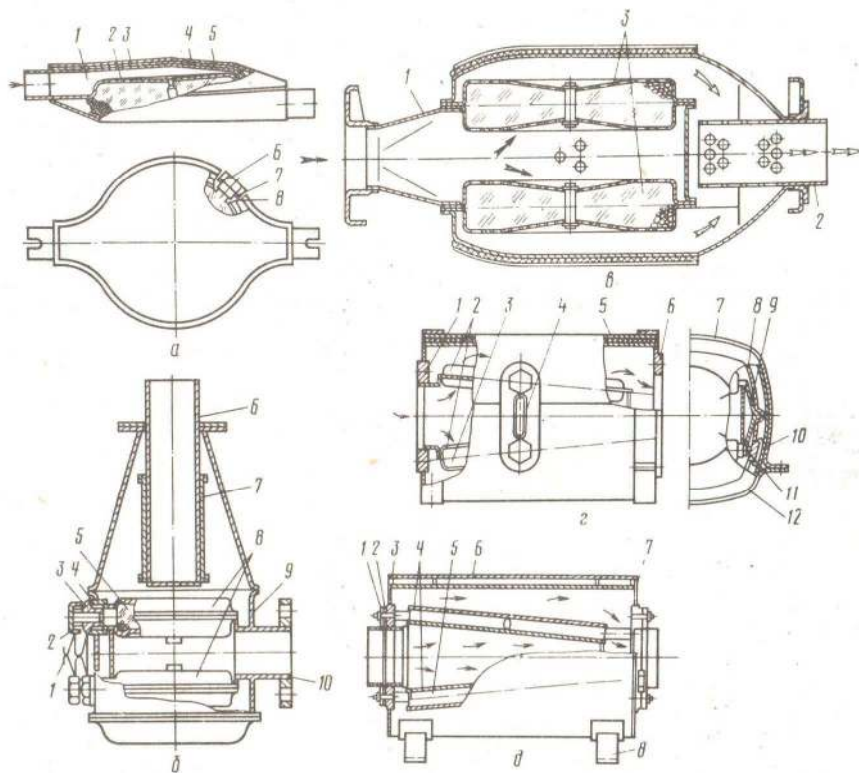


Рис. 43. Каталитические нейтрализаторы:

а — 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 — реакторы; 9 — корпус; 10 — входной патрубок; *в* — типа Н-32: 1 — впускной патрубок; 2 — выпускной патрубок; 3 — реакторы; *г* — типа 31Б: 1 — фланец; 2 — реакторы; 3 — катализатор; 4 — проволока; 5 — теплоизоляция; 6 — фланец; 7 и 12 — полухомуты; 8 — корпус; 9 — опоры; 10 — заглушка; 11 — пробка; *д* — типа НД-38А: 1 — фланец; 2 — прокладка; 3 — фланец; 4 — реакторы; 5 — катализатор; 6 — корпус; 7 — фланец; 8 — патрубок

ют два вида катализаторов, полученных нанесением активного компонента на гранулированный (чаще всего сферический) носитель блочной или монолитной структуры. Соответственно различают и две конструкции КН. Основное достоинство КН с гранулированным катализатором — возможность замены вышедшего из строя катализатора. К числу недостатков КН подобного типа относят высокое аэродинамическое сопротивление каталитического слоя, а также недостаточно полное использование каталитической поверхности за счет наличия застойных зон.

Жидкостные нейтрализаторы. Заполненный водой ЖН интенсивно поглощает (на 50...100 %), но не улавливает CO , 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 CO , CH_x и альдегидов, но значительно увеличивает выбросы H_2SO_4 . Поэтому при использовании такой комбинированной системы очистки возрастает необходимость поглощения тумана H_2SO_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 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 °С до полной взаимной смешиваемости при 66 °С.

Температура воды в ЖН порядка 40 °С благоприятна для поглощения газов (SO_2 , CO_2 , формальдегид); при повышении температуры до 90 °С ухудшение поглощения газов в какой-то степени компенсируется увеличением поглощения паров жидких и твердых веществ за счет их растворения; приближение температуры воды к 100 °С приведет к усилению процессов перегонки с паром и азеотропной перегонки, 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 (Na_2SO_3) с добавкой гидрохинона, соды (Na_2CO_3), двууглекислой соды (NaHCO_3), едкого кали (КОН), едкого натра (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 КОН 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 зародышей, приводящих к образованию капель. Несмотря на несмачиваемость сажи в нормальных условиях,

зародышеобразование в первую очередь начинается на поверхности частиц сажи. 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 частицы сажи. При выходе из нейтрализатора капли с частицами сажи 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 частиц 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 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 устанавливаются 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, 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 движения ОГ, как правило, составляет 2...3 м/с. При скорости движения 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.

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

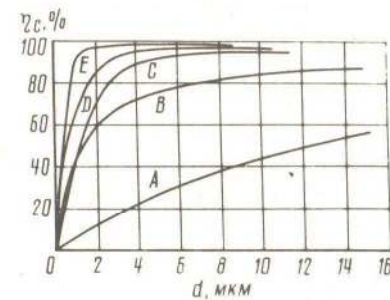


Рис. 44. Кривые эффективности улавливания для различных типов пылеулавливателей:

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

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/м². Эффективность очистки ОГ с помощью ЖН барботажного типа составляет по альдегидам до 50...100 %, по NO_x — 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 и либо в ней растворяются, либо химически 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 се-

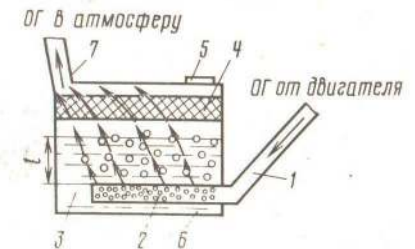


Рис. 45. Принципиальная схема ЖН: 1 — выпускной трубопровод дизеля; 2 — перфорированная труба; 3 — емкость с нейтрализующим раствором; 4 — фильтр; 5 — заливная горловина; 6 — корпус нейтрализатора; 7 — трубопровод; 1 — уровень заливки нейтрализующего раствора

диментации. 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 габаритах) 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, величина 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 ранее разработанных машин перспективна принципиально новая конструкция

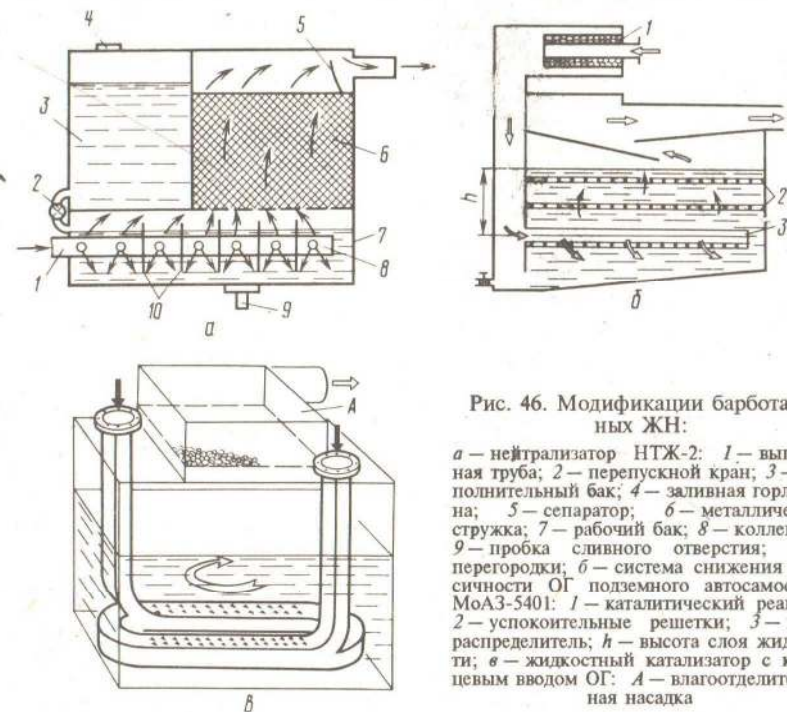


Рис. 46. Модификации барботажных ЖН:

a — 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; *b* — система снижения токсичности ОГ подземного автосамосвала МАЗ-5401: 1 — каталитический реактор; 2 — успокоительные решетки; 3 — газораспределитель; *h* — высота слоя жидкости; *в* — жидкостный катализатор с кольцевым вводом ОГ: *A* — влагоотделительная насадка

ЖН, у которого реализована идея использования кузова (платформы) машины для размещения его в двойных стенках днища, боковых и переднем бортах. Такое исполнение позволяет оставить практически без изменения общую компоновку машины и ее габариты.

На рисунке 47, *a* приведена общая схема такого ЖН на примере автосамосвала 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 переднем борту 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, *b* и *в* показаны конструкции ЖН для автосамосвалов МАЗ-503А, КрАЗ-256Б.

22. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ОГ ДИЗЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЖН

Нагрузка, % номинальной	Очистка по компонентам, %				
	Сажа	СН _x	Альдегиды	NO _x	Запах, слезоточивое действие
Холостой ход	90	8090	8090	До 10...15	Значительное снижение
50	4050	7080	8090	До 10	То же
100	20	6580	7080	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 в раствор и задерживаются в нем благодаря силам гравитации и инерции. В целом эффективность этих очистителей ниже барботажных, они удовлетворительно улавливают лишь частицы размером более 200 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.

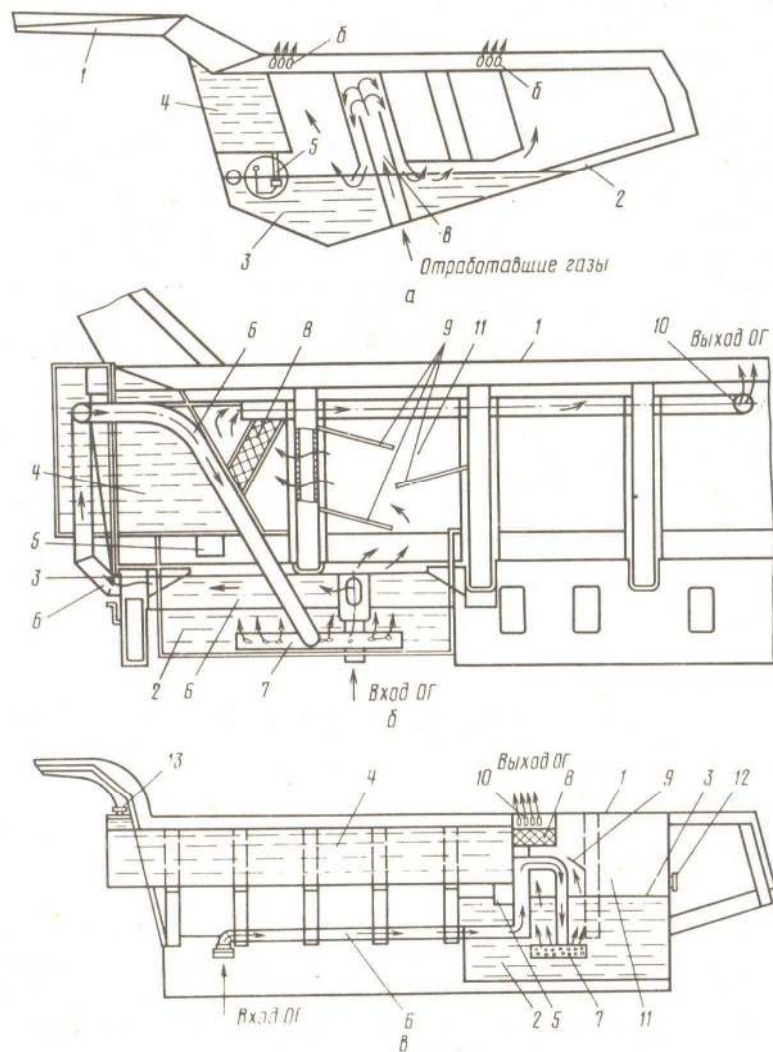


Рис. 47. Модификации кузовных ЖН:

а — для автосамосвала БелАЗ-540А: 1 — кузов; 2 — емкость; 3 — ресивер; 4 — бак; 5 — трубка; б — для автосамосвала МАЗ-503А: 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 — выпускной трубопровод; 11 — запасная емкость; в — 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

Применение их целесообразно при улавливании частиц сажи 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 которых осуществляется с помощью лопаток ротора, имеющего привод от электродвигателя. Широкого распространения они не нашли главным образом из-за очень больших габаритов и сложности конструкции.

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.

Распыляющие ЖН. Принцип их действия 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, представляющий собой трубку Вентури, в которую подводится нейтрализующий раствор, а перед выбросом ОГ в атмосферу устанавливается каплеуловитель. В целом распыляющая конструкция ЖН характеризуется очень малыми габаритами, простотой конструкции и эксплуатации и очень высокой эффективностью действия при умеренных сопротивлениях.

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

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 эффективностью 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 увеличиваются 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) ОГ 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 обозначены 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 в него воды из водяного бака в количестве, соответствующем условиям полного испарения воды, и емкость с насыпкой.

Рециркуляция ОГ. Под рециркуляцией ОГ понимается такой способ работы ДВС, при котором искусственно увеличивается доля остаточных газов. Это достигается либо регулированием фаз газораспределения, либо за счет соединения впускного и выпускного трубопроводов рециркуляционным.

В рециркуляционном трубопроводе устанавливают орган регулирования — заслонку 4 (рис. 49). На впуск могут возвращаться как неохлаждаемые ОГ, так и охлаждаемые — так называемые «горячая» и «холодная» рециркуляции.

Рециркуляция влияет на состав ОГ как вследствие воздействия

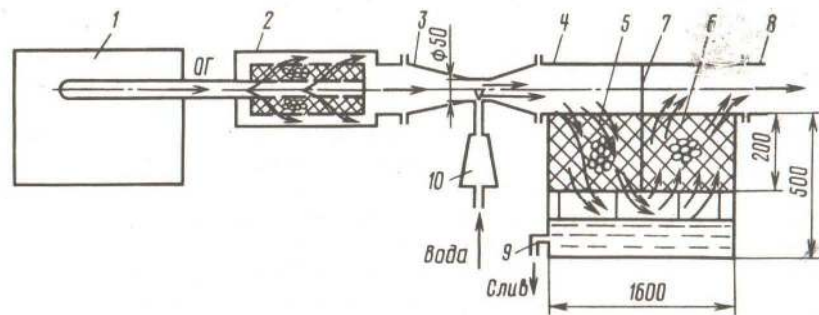


Рис. 48. Схема установки макетного образца ЖН

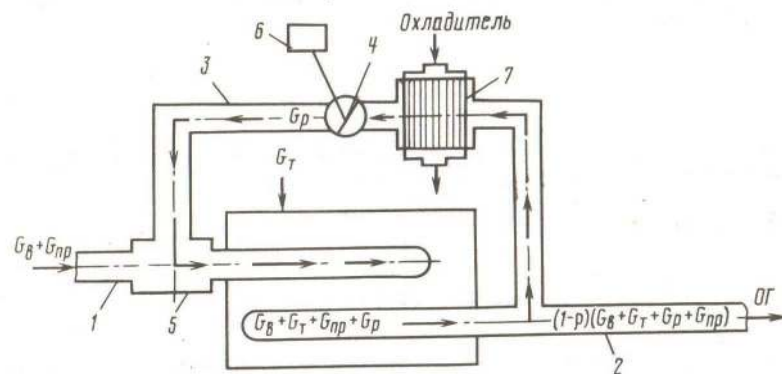


Рис. 49. Принципиальная схема системы рециркуляции ОГ:

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

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 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 NO_x образуется в первой половине процесса сгорания. Полученное запаздывание процесса тепловыделения является, по-видимому, основным фактором, вносящим вклад в образование NO_x . Значительное влияние при этом должно оказывать снижение концентрации кислорода и увеличение теплоемкости впускного заряда (за счет увеличения содержания в нем H_2O и CO_2).

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

Применение неохлажденных ОГ не только эффективно уменьшает выброс NO_x (особенно для дизелей с непосредственным впрыскиванием), но и приводит к заметному росту выброса сажи. Анализ имеющихся данных показывает, что применение «холодной» рециркуляции ОГ с точки зрения снижения 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 ρ понимают отношение массовой части ОГ, циркулирующих в цикле, ко всему массовому заряду

рабочего тела, поступающего в цилиндры дизеля. Согласно данному определению можно записать:

$$\rho = G_p / G_\Sigma, \quad (38)$$

где G_p — массовый расход рециркулируемых ОГ; G_Σ — 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

$$\rho = G_p / (G_p + G_b). \quad (41)$$

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

$$\alpha = G_b / (L_b G_T) \quad (42)$$

(здесь L_b — 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 λ (для отличия от α). Определим λ 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

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

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

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

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

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_b — температура воздуха на входе в ресивер; t_p — температура рециркулируемых ОГ на входе в ресивер.

В ресивере происходит смешение ОГ с впускным воздухом. Точность подсчета степени рециркуляции по формуле (46) 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 ρ на различных нагрузочных режимах приводит к тем большему снижению концентрации NO_x , чем выше нагрузка дизеля. Концентрация NO_x на холостом ходу практически не изменяется. Тем не менее выбросы как NO_x , так и всего количества ОГ в атмосферу уменьшаются пропорционально ρ в целом полученные зависимости изменения концентрации

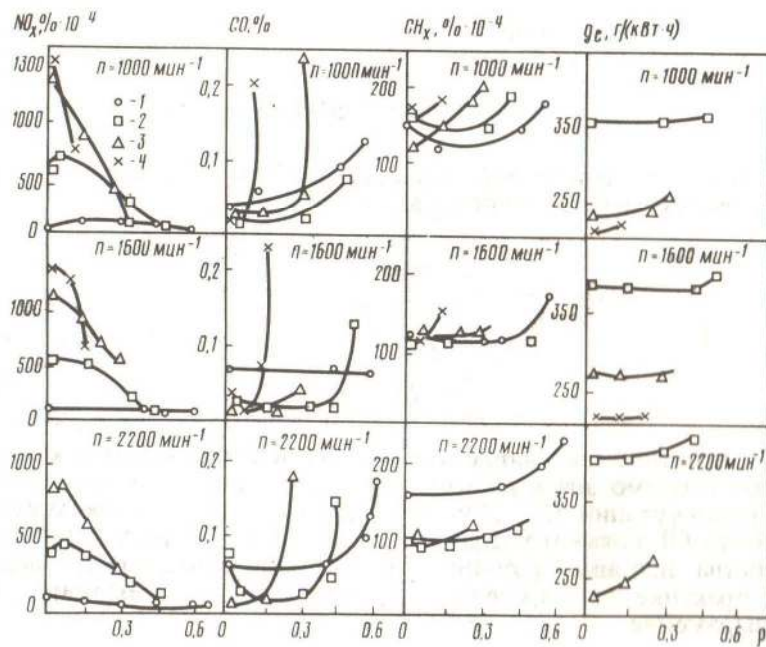


Рис. 50. Влияние рециркуляции ОГ на их токсичность и удельный расход топлива при различных нагрузках дизеля Д-240:
1 — 0,03 МПа; 2 — 0,185 МПа; 3 — 0,370 МПа; 4 — 0,555 МПа

NO_x в ОГ имеют вид парабол, максимум которых смещается в сторону снижения ρ при увеличении нагрузки дизеля.

Концентрации CO и CH_x по мере увеличения ρ сначала остаются постоянными, а затем, начиная с определенного значения ρ , зависящего от нагрузки дизеля, резко возрастают.

Если принять содержание CO и 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 испытываемых дизелей зависимость изменения ρ 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 ρ 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: атмосферных условий, состава топлива, наработки двигателя, технологических допусков, быстродействия системы рециркуляции, тепловой инерционности 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.

23. ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ НА ТОКСИЧНОСТЬ ОГ ДИЗЕЛЯ Д-240

Вариант выбросов	Оценочные удельные выбросы		
	q_{NO_x}	q_{CO}	q_{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

Из данных таблицы следует, что применение выбранного закона управления рециркуляцией ОГ двигателя Д-240 обеспечивает снижение суммарного выброса NO_x на 30,4 %, CH_x — примерно на 20 %, 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 уменьшить токсичность ОГ по оксидам азота.

При менее жестких требованиях по токсичности может быть достигнуто снижение выброса в атмосферу всех токсичных компонентов, а при более жестких — резкое снижение выброса NO_x при сохранении или даже увеличении выброса в атмосферу CO и 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,

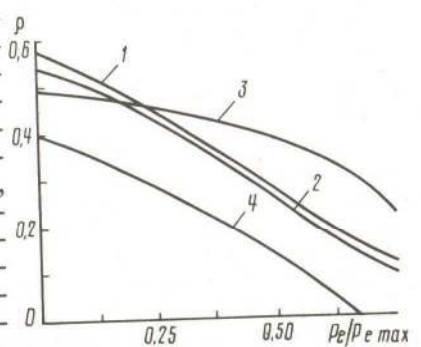


Рис. 51. Зависимость изменения степени рециркуляции ОГ от нагрузки для различных дизелей:
1 — Д-240; 2 — Д-50; 3 — ЯМЗ-236; 4 — закон, рекомендуемый для применения

связанных с форсированием 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, комбинированные и т. п. Рассмотрим некоторые из них.

Типичной системой рециркуляции ОГ с механическим приводом является система по а. с. СССР № 547538.

В этой системе дизель 1 (рис. 52, а) с впускным 2 и выпускным 3 трубопроводами снабжен рециркуляционным трубопроводом 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 13 нагрузки, подсоединенным к рейке 14 топливного насоса 15, а другим концом через пружину 16 и установленную на траверсе плитку 17 — с плечом 7. Рейка топливного насоса через датчик нагрузки сообщена тягой 18 с педалью 19, установленной в кабине водителя.

На режимах частичных нагрузок педаль 19 через тягу 18, траверсу 12, 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 привод 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, блокированы с рейкой топливного насоса, что снижает надежность работы дизеля в целом.

В системе рециркуляции ОГ с пневматическим приводом по а. с. СССР № 637543 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 выполнен в виде мембраны 7, установленной в корпусе 8 и делящей его на две полости 9 и 10.

Полости 9 снабжены пружинами 11 и соединены с трубопрово-

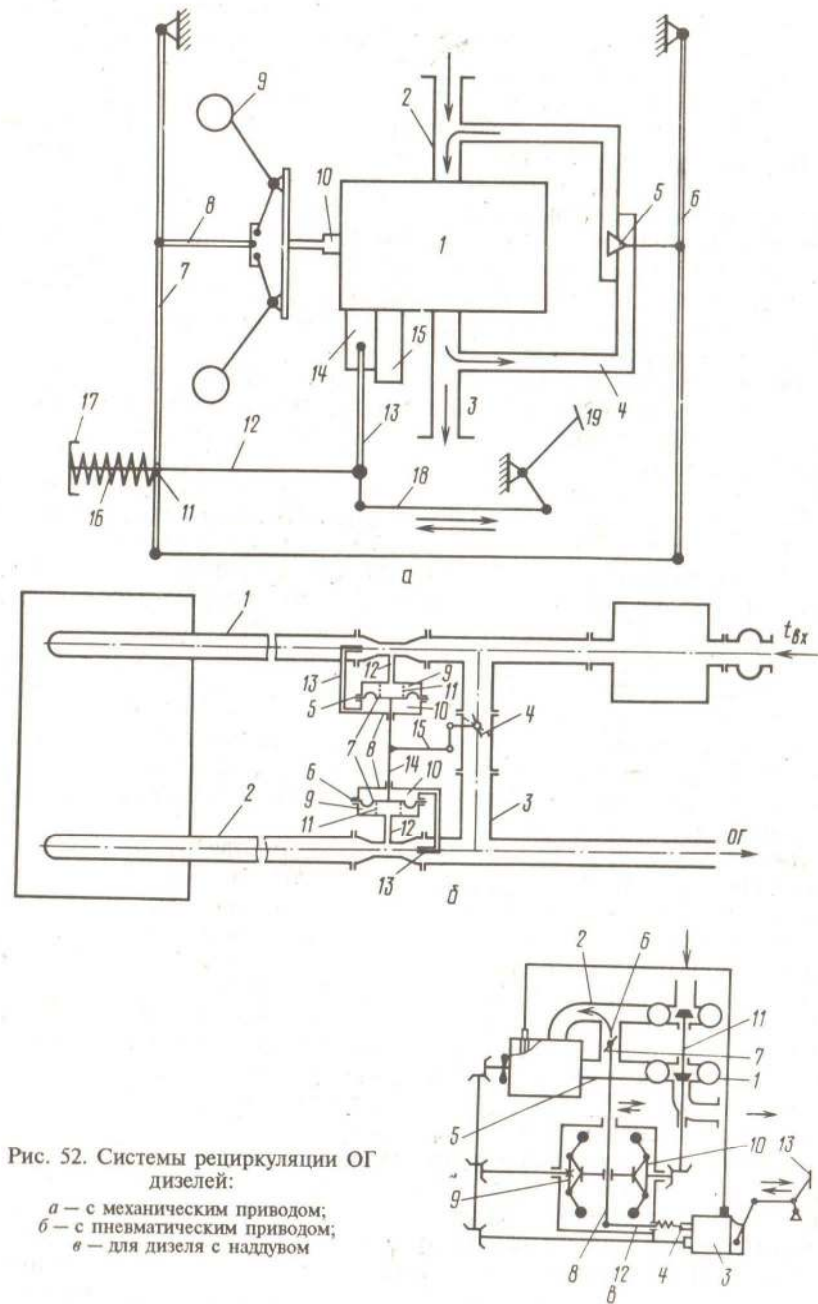


Рис. 52. Системы рециркуляции ОГ дизелей:

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

дами 1 и 2 через трубки 12, а полости 10 — с теми же трубопроводами через трубки Пито 13. Мембраны 7 заблокированы с запорным органом 4 через соединяющий их шток 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 рециркуляции ОГ для дизелей с турбонаддувом. В соответствии с а. с. СССР № 767378 к ДВС подключены турбокомпрессор 1 (рис. 52, в), подсоединенный 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, вызываемое 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 про-

цесс (обеспечивающие в основном эффективное снижение выброса с ОГ NO_x и сажи), так и средства физико-химической очистки ОГ (обеспечивающие в основном эффективное снижение выброса с ОГ C , CO , 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 режимным параметрам дизеля. Для практики наиболее важным является определение взаимного влияния отдельных средств и методов.

Общий вид комплексной ССТ для трактора показан 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 с сектором 6 расположен в выпускном трубопроводе 3 дизеля 4 по ходу потока ОГ и поддерживается кронштейном 5.

Жидкостный нейтрализатор установлен в системе выпуска дизеля после КН 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.

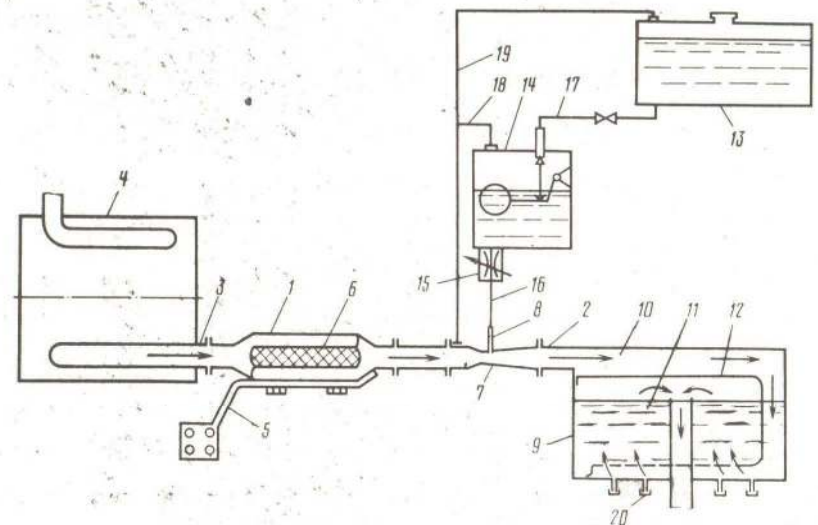


Рис. 53. Схема универсальной системы снижения токсичности ОГ дизелей

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 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 постоянным независимо от количества воды в баке 13.

Система снижения токсичности ОГ работает следующим образом. От выпускного трубопровода двигателя ОГ поступают в КН, в реакторе которого происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива (CO , 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 происходят резкое торможение смеси ОГ и капелек с парами воды, их конденсация и накапливание 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, разработанные 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 впрыскивания топлива регулируется с 26 до 18 град п.к.в. до в.м.т., 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 CO снижается на 35...50 %, 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 комплектуется на тракторе и не создает помех при работе в теплицах.

Аналогичные системы разработаны для самоходных шасси Т-16М и СШ-28Т, на которых устанавливают этот же дизель.

Система снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80 с дизелем Д-240 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, 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_x с 17,38 до 9,95 г/кВт (за счет уменьшения угла опережения впрыскивания топлива с 26 до 20 град п.к.в. и применения рециркуляции ОГ), оксида 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 комплектуется 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_x , 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 комплектации системы. При малых нагрузках двигателя в процессе эксплуатации, наоборот, целесообразно использовать КН, можно исключить применение рециркуляции.

Система снижения токсичности ОГ трактора Т-130 с дизелем Д-160В. В качестве базовой модели двигателя использован дизель Д-160В в малотоксичной модифи-

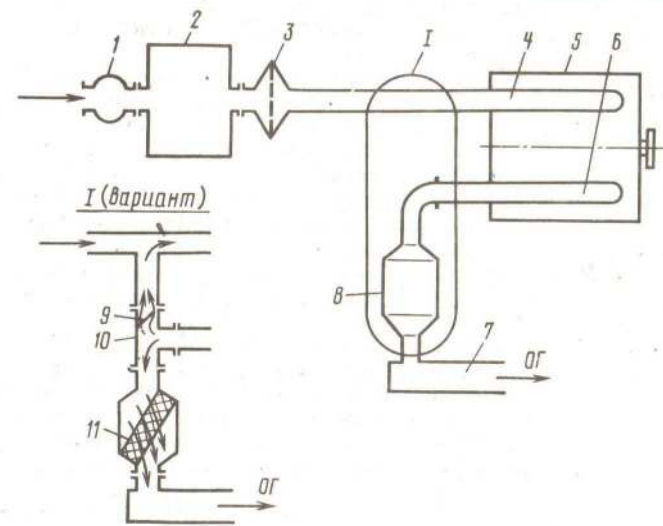


Рис. 54. Схема системы снижения токсичности ОГ трактора МТЗ-80:
1 — расходомер воздуха; 2 — ресивер; 3 — воздухоочиститель; 4 — впускной трубопровод; 5 — двигатель Д-240; 6 — выпускной трубопровод; 7 — выпускной трубопровод стенда; 8 — глушитель; 9 — заслонка; 10 — тройник; 11 — нейтрализатор Н-23

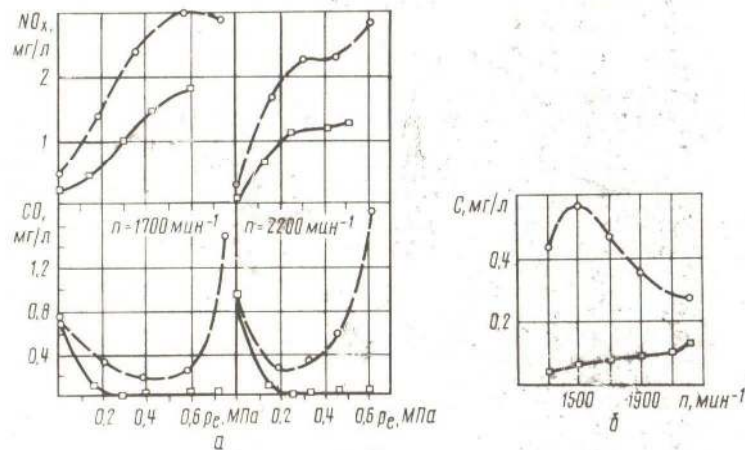


Рис. 55. Влияние ССТ на токсичность и дымность ОГ дизеля Д-240:
 а — по оксидам азота (NO_x) и оксиду углерода (СО) в зависимости от среднего эффективного давления; б — по характеристике дымности ОГ (по внешней характеристике); \square — с системой

кации, 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 $15...17$ град п.к.в. до в.м.т.

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, являющийся одновременно каплеуловителем. Для сохранения высокой эффективности жидкостной очистки ОГ трактора Т-130 в течение всей рабочей смены в ЖН предусмотрено использование только свежей воды, подаваемой из специального бака в сопло Вентури.

Форма и габариты 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, а и б приведены зависимости степени очистки ОГ по СО и CH_x 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_x практически отсутствует (рис. 56, в).

Снижение в 2 раза выбросов NO_x 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 бенз(а)пирена — на рисунке 56, д.

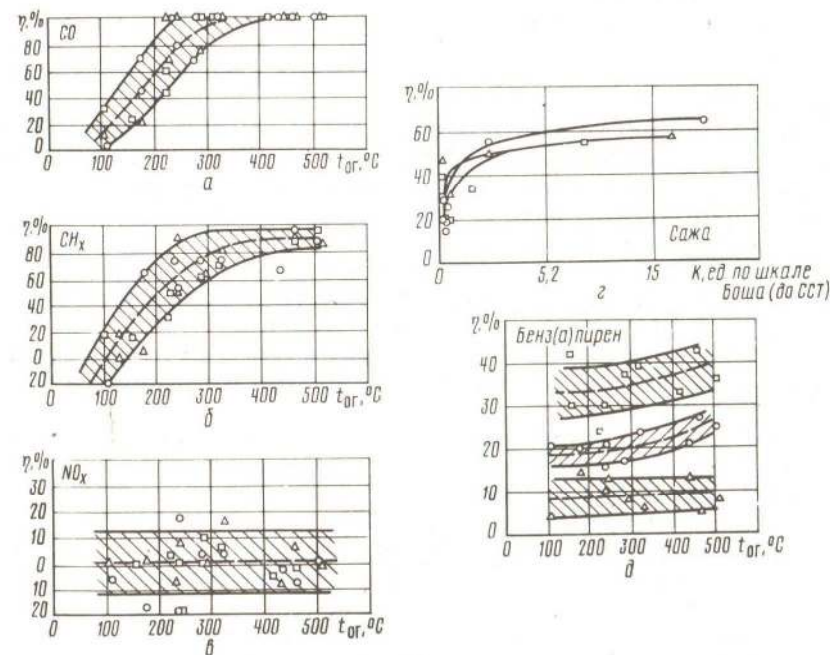


Рис. 56. Эффективность (η) очистки ОГ дизеля с помощью комбинированной системы очистки:

а — по оксиду углерода (СО); б — по углеводородам (CH_x); в — по оксидам азота (NO_x); г — по саже (С) в зависимости от концентраций (мг/л); д — по бенз(а)пирену в зависимости от температуры ОГ ($t_{ог}$, °С)

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 относятся калориметрический метод. К физическим относятся методы, использующие физические свойства исследуемых веществ:

поглощение (абсорбция) ультрафиолетового или инфракрасного излучения;

теплопроводность 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 разделяют:

на приборы непрерывного анализа ОГ, поступающих 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 (НИР) 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 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 объектом (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 системы анализа низкой концентрации исследуемого вещества и высокой его концентрации, а также поддержания пробоотборных трубопроводов в диапазоне температур 70...200 °С. При измерении содержания 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 проб основан на отборе ОГ в количестве, пропорциональном количеству воздушного заряда, поступающего в двигатель. На входе устанавливают датчик расхода воздуха, количество отбираемых ОГ регулируют 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 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 отобранной пробы. При этом методе отбор пробы происходит с обезвоживанием ОГ за счет охлаждаемой при 0 °С ловушки, поэтому часть NO_x и CH_x теряется. 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 отбирают пробоотборником, разбавляют очищенным воздухом в постоянной пропорции к их количеству. Про-

порция разбавления 8:1 и выше. Разбавляемая смесь проходит через теплообменник, на выходе из которого устанавливают постоянную температуру смеси около 5...6 °С. Расход смеси поддерживают постоянным (обычно 10...15 м³/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 требуется 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 применяют 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 ОГ лучистой радиации в инфракрасной, ультрафиолетовой или видимой областях спектра. Концентрация каждого компонента в результате определяется пропорционально степени поглощения лучистой радиации.

В частности, при работе газоанализатора по способу *NDIR* область поглощения CO — длины волн 4,5...5,0 мкм в инфракрасной области спектра. Инфракрасное излучение от двух одинаковых источников света 1 (рис. 57, а) через обтюратор 2, кювет-фильтры 3 попадает в две отделенные одна от другой кюветы 4 и 5, из которых сравнительная 4 заполнена инертным газом (азотом), а измерительная 5 — ОГ. 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 — упрощенные.

Наиболее точный (точнее, в 1,8...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) А1А-2», по методу *FID* — «Бекман 109», «Хориба F1А».

Для определения концентрации NO и NO_x широкое распространение получили соответственно методы *NDIR* и *NDUV*. При определении NO_x как суммы NO + NO₂ эти концентрации скла-

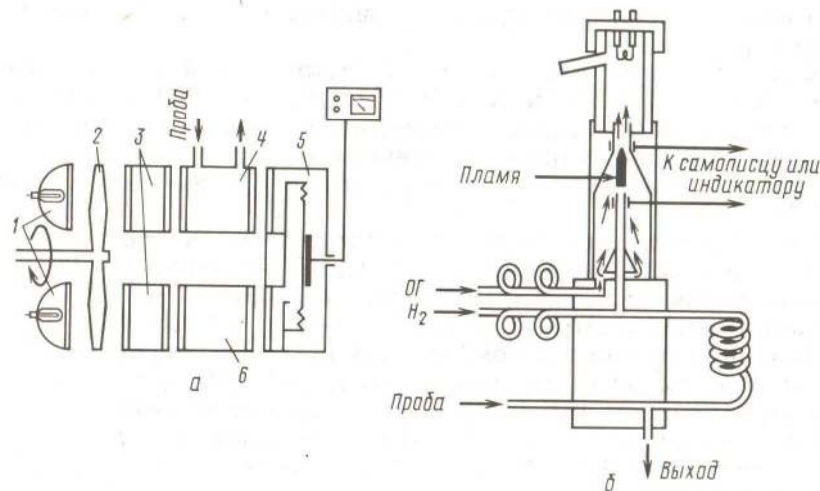


Рис. 57. Схемы газоанализаторов:
а — недисперсный инфракрасный анализатор (*NDIR*);
б — пламенно-ионизационный анализатор (*FID*)

дываются. Для оценки NO_x находят 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: «Хориса» («Мекса-77», «Мекса-2000», *CLA-11*), «Янако», «Рикен» (модель *RS-325*), «Стек» (модель *SGCM-18*), «Янагимота» (модель *EIEC-88*) в Японии, а также «Бекман», «Скотт» (модель 125) в США.

Для определения содержания бенз(а)пирена 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_2 , CH_x , NO и NO_x . Такими анализаторами, в частности, являются «Мекса-77», *EIEC-88*, «Бекман» модели 951 и ряд других. Это в основе своей (96%) быстродействующие газоанализаторы со скоростью срабатывания около 1...2 с, позволяющие анализировать ОГ на установившихся и неустойчивых режимах работы двигателя, снабженные 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 неустойчивых режимах.

При измерении токсичности ОГ тракторных и комбайновых дизелей по ОСТ 23.1.440—76, ГОСТ 17.2.05.—86 и ГОСТ 18509—88 отбор и анализ ОГ должны производиться при применении автоматических газоаналитических приборов непрерывного действия:

по CO — недисперсным инфракрасным газоанализатором (*NDIR*);

по CH_x — пламенно-ионизационным газоанализатором (*FID*);

по NO_x — хемилюминесцентным 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_x — хроматограф «Цвет-101» с пламенно-ионизационным детектором, при анализе NO_x — фотокалориметр ФЭК-3М в сочетании с измерением с помощью реактива Зальцмана.

Данные по ряду применяемых в России и за рубежом газоанализаторов приведены в таблице 24.

24. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ОГ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Модель (страна)	Измеряемый компонент	Метод измерения	Диапазон измерения, % по объему	Погрешность (относительная)	Примечание
ОА-5501 (Россия)	CO	<i>NDIR</i>	0...0,5	10	Стационарный
«Бекман 895» (США)	CO	<i>NDIR</i>	0,1...100	1	То же
«Бекман 1R-2158» (США)	CO	<i>NDIR</i>	0,1...100	1	»
«Мекса-300» (Япония)	CO , CH_x	<i>NDIR</i>	0...2 0...8	2 2	Переносной То же
«Мекса-400» (Япония)	CO CH_x NO_x	<i>NDIR</i> <i>NDIR</i> <i>NDIR</i>	0...0,1 0...0,5 0...10	2 2 2	Передвижной То же »
«Мекса-2000» (Япония)	CO CH_x NO_x	<i>NDIR</i> <i>NDIR</i> <i>CLD</i>	0...10 ⁻³ 0...2·10 ⁻³ 0...2·10 ⁻³	2 2 2	Газоаналитический комплекс
ЕН-100 (Япония)	CH_x	<i>FID</i> <i>FID</i>	0...10 0...5·10 ⁻³	1 1	То же »
НС-101 (Япония)	CH_x	<i>FID</i>	0...5·10 ⁻³	0,5	»
«Бекман 951» (США)	NO_x	<i>CLD</i>	0...0,1	0,5	»
САН 1020/1120 (США)	CO CH_x	<i>NDIR</i> <i>NDIR</i>	0...10 0...2·10 ³	5 5	Диагностический комплекс То же
АСГА-Т (Россия)	CO , CH_x CO_2 NO_x	<i>NDIR</i> <i>NDIR</i> <i>NDIR</i>	0...2·10 ³ 0...2·10 ³ 0...2·10 ³	2 2 2	» » »

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 образовавшегося количества раствора 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 РФ проводится методом экстракции бенз(а)пирена 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.

Существующие приборы-дымомеры первой группы выпускаются различными странами. К ним можно отнести следующие:

«Бош» (Германия), «Фон Бранд» (США), ИД-1 конструкции НАМИ (Россия), «ЛАНЭ-35/300» конструкции ЛанЭ (Россия), NS-112 (Чехия), AVL (Австрия).

Дымомеры второй группы также широко известны: «Хартридж» (Англия), «Волво» (Швеция), «Утак» (Франция), «Мерлин» (Англия) и др.

Наибольшее распространение получили дымомеры «Бош» и «Хартридж».

Дымомер «Бош». Проба ОГ объемом 330 см^3 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 фотозлементом. Количество света, отраженного рабочей поверхностью фильтра, таким образом, преобразуется в фототок, регистрируемый микроамперметром, имеющим шкалу, градуированную в единицах шкалы Боша.

Такие дымомеры не дают высокой точности измерения, но они весьма удобны, компактны и могут применяться не только в условиях стендовых испытаний, но и на машинах в условиях эксплуатационных испытаний.

Дымомер «Хартридж». Для измерения дымности ОГ в дымомерах типа «Хартридж» используется зависимость Бруна между оптической плотностью ОГ и силой света источника света:

$$D = \frac{k}{K} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (47)$$

где D — плотность дыма; I_0 — сила света источника света; I — регистрируемая сила 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

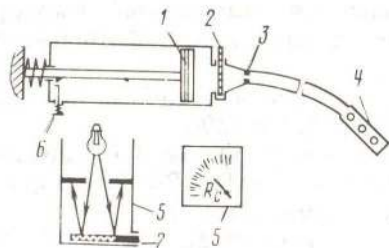


Рис. 58. Схема дымомера типа «Бош»: 1 — насос; 2 — фильтр; 3 — дросселирующее отверстие; 4 — пробоотборник; 5 — анализирующий прибор; 6 — фиксатор поршня

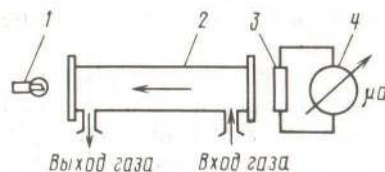
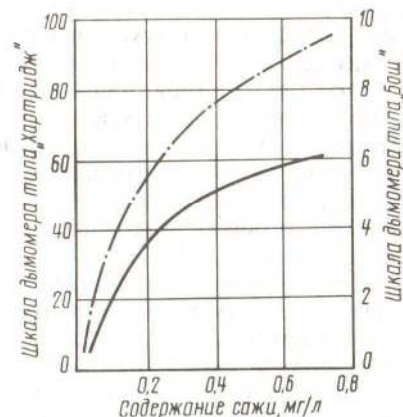


Рис. 59. Схема измерения дымности ОГ методом просвечивания (дымомер типа «Хартридж»): 1 — источник света; 2 — измерительная кювета; 3 — фотозлемент; 4 — измерительный прибор

Рис. 60. Соотношение показателей саже-содержания, измеренного дымомерами типа «Бош» и «Хартридж»:
- - - - «Хартридж»; — — — «Бош»



помощью дроссельной заслонки создают избыточное давление Δp в измерительной камере от 50 до 75 мм вод.ст., а температуру газа поддерживают на уровне 70°C , для чего предусмотрено водяное охлаждение отбираемых для измерения ОГ.

Дымность при этом оценивается по оптической плотности ОГ при их просвечивании. Высота столба измерительного участка составляет около 0,5 м.

Схема дымомера «Хартридж» показана на рисунке 59. Это двухканальная оптическая схема, в один из каналов которой подают очищенные в золо- и водоотделениях ОГ, а в другой — чистый воздух, служащий для калибровки и тарировки прибора. Источник света — лампа накаливания с цветовой характеристикой 2800...3250 К. В качестве приемника света применен фотозлемент. Прибор имеет равномерную шкалу измерения, разделенную на 100 единиц. Перед измерением прибор тарируют, устанавливая перед фотозлементом специальный фильтр, имеющий известные характеристики светопоглощения. Преимущество дымомера типа «Хартридж» — 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 протекание процессов в них; выбор оптимального состава топливовоздушных смесей и т. д. Задачи первого вида называют *интерполяционными*, а второго и третьего — *экстремальными*. Первые требуют отыскания лишь зависимости между пара-

метром оптимизации и факторами, влияющими на него; вторые — отыскания экстремума функции, описывающей с достаточной точностью объект или процесс.

С одной стороны, планирование 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 обеспечивающее 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 называют эксперимент, в котором для изучения процесса одновременному 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 эффективной 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 характерис-

тикой 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 компромиссную 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, которое способно 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 *оптимальное управление возможно при неполной информации*, может служить модель «черного ящика». Схема черного ящика приведена на рисунке 61. Объект исследования — прямоугольник. Выходы (обозначены 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 количественными и качественными. 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 поддер-

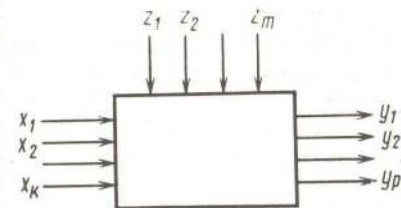


Рис. 61. Схема «черного ящика»: x_1, x_2, \dots, x_k — управляемые факторы; z_1, z_2, \dots, z_m — неуправляемые факторы; y_1, y_2, \dots, y_p — критерии оптимизации

жания 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: совместности и независимости факторов. Под совместностью 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, усредненные. Графически показано влияние на содержание в ОГ NO_x , CH_x , режимных факторов при работе дизеля Д-37Е на различных режимах. С помощью характеристик можно оценить систему топливоподачи с различными углами начала впрыскивания топлива.

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 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]:

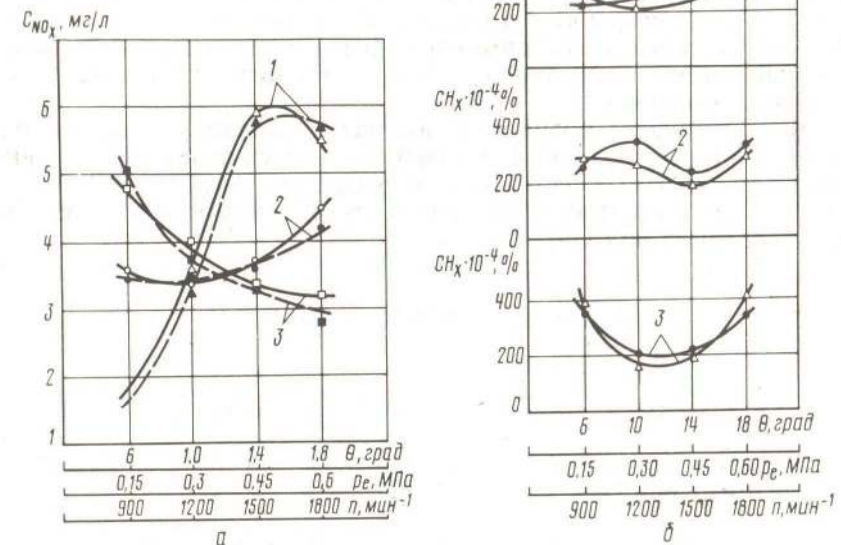


Рис. 62. Токсические характеристики дизеля Д-37Е (усредненные кривые выхода в ОГ):

a — NO_x ; *b* — CH_x в функции; 1 — среднего эффективного давления; 2 — установочного угла опережения впрыскивания топлива; 3 — частоты вращения; ●, ▲ и ■ — постоянное начало подачи; ○, △ и □ — переменное начало подачи

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, q, \quad (48)$$

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 долях или процентах. При планировании эксперимента для решения задач на диаграммах состав — свойство предполагается, что изучаемое свойство — непрерывная функция 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 собой (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, 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]:

$$y = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \beta_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (49)$$

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]:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_1 2x_1 x_2 + \beta_1 3x_1 x_3 + \beta_2 3x_2 x_3 + \beta_1 2 3x_1 x_2 x_3, \quad (50)$$

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:

$$G = \frac{S_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^m S_u^2} \leq G_{0,05; f_n; f_u}, \quad (51)$$

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; $S_{u\max}$ — наибольшая из дисперсий в строках плана; $G_{0,05; f_n; f_u}$ — табличные значения 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

$$S_y = \sum_{u=1}^n S_u^2 / n. \quad (52)$$

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 $\Delta y = y_{\text{экс}} - y_{\text{расч}}$; n — число параллельных опытов в каждой точке; S_y — среднее квадратическое отклонение; ξ — величина, зависящая только от состава смеси.

Для трехкомпонентных смесей значения ξ 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 $t_{\text{экс}} < t_{\text{таб}}$ для всех контрольных точек.

При изучении диаграмм состав — свойство q -компонентных смесей 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 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⁻¹. Установочный угол опережения 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, 30 % (0,3) — осуществимо, 0 % (0) — осуществимо.

По воде: 100 % (1,0) — неосуществимо, 75 % (0,75) — неосуществимо, 50 % (0,5) — осуществимо, 25 % (0,25) — осуществимо, 0 % (0) — осуществимо.

В общем случае границы локального участка диаграммы были следующие: $50\% \leq \text{ДТ} \leq 100\%$; $0 \leq \text{метанол (М)} \leq 30\%$; $0 \leq \text{вода (В)} \leq 50\%$. Нижняя грань локального симплекса в натуральных переменных позволяет изменить концентрацию ДТ от 0,5 до 1,0.

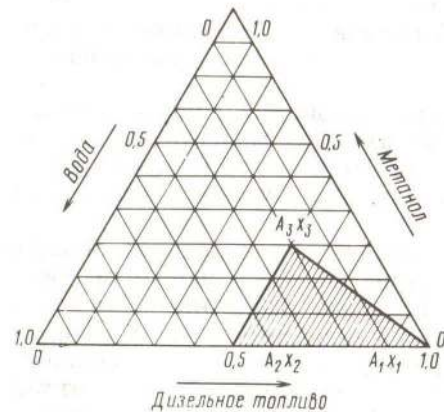


Рис. 63. Расположение триангулированных компонентов и область экспериментирования (заштрихованный участок) при подаче метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1

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:

$$\text{ДТ} = 100x_1 + 50x_2 + 50x_3;$$

$$\text{В} = 50x_2 + 20x_3;$$

$$\text{М} = 30x_3.$$

(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, %		
	ДТ	М	В
x_1	100	0	0
x_2	50	50	0
x_3	50	20	30

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

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.

27. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ЗНАЧЕНИЕ ДИСПЕРСИЙ В ТОЧКАХ

Индекс отклика	Параметры оптимизации (в скобках даны значения S^2_u)	
	N_c	NO_x
y_1	21,12(0,0108)	3,703(0,0272)
y_2	10,92(0,0108)	2,690(0,0144)
y_3	14,94(0,0324)	2,426(0,0477)
y_{12}	12,78(0,0324)	1,800(0,8240)
y_{13}	17,34(0,396)	2,133(0,0072)
y_{23}	19,26(0,324)	2,746(0,014)
y_{123}	16,56(0)	2,100(0,0169)

Индекс отклика	Параметры оптимизации (в скобках даны значения $S^2_{\text{в}}$)		
	CH_x	C	CO
y1	0,1120(0,000163)	7,966(0,063334)	0,756(0,00246)
y2	0,0173(0,000046)	3,450(0,157500)	0,038(0,00056)
y3	0,0250(0,000028)	2,966(0,003334)	0,228(0,00174)
y1 2	0,0097(0,000025)	2,633(0,100833)	0,105(0,00194)
y1 3	0,0280(0,000039)	5,366(0,003334)	0,215(0,00310)
y2 3	0,0260(0,000061)	5,716(0,035834)	0,189(0,0023)
y1 2 3	0,0350(0,000021)	4,750(0,03)	0,212(0,0030)

Для дизеля Д-21А1 при подаче метанола и воды на впуске по результатам экспериментальных данных определены коэффициенты полиномов и получены следующие уравнения:

$$N_e = 21,12x_1 + 10,92x_2 + 14,94x_3 - 12,96x_1x_2 - 2,76x_1x_3 + 25,32x_2x_3 - 4,5x_1x_2x_3 \quad (\text{кВт}); \quad (55)$$

$$NO_x = 3,703x_1 + 2,690x_2 + 2,426x_3 - 5,586x_1x_2 - 3,726x_1x_3 + 0,752x_2x_3 + 3,009x_1x_2x_3 \quad (\text{мг/л}); \quad (56)$$

$$CH_x = 0,112x_1 + 0,0173x_2 + 0,0250x_3 - 0,2198x_1x_2 - 0,162x_1x_3 + 0,0194x_2x_3 + 0,6435x_1x_2x_3 \quad (\text{мг/л}); \quad (57)$$

$$C = 7,966x_1 + 3,450x_2 + 2,966x_3 - 12,3x_1x_2 - 0,4x_1x_3 + 10,032x_2x_3 + 6,812x_1x_2x_3 \quad (\text{ед. по шкале Боша}); \quad (58)$$

$$CO = 0,756x_1 + 0,038x_2 + 0,228x_3 - 1,168x_1x_2 - 1,108x_1x_3 + 0,224x_2x_3 + 2,682x_1x_2x_3 \quad (\%). \quad (59)$$

Результаты статистического анализа и проверки адекватности полученных уравнений приведены в таблице 28. Проверка показала, что процесс воспроизводим, а полученные уравнения неполного третьего порядка адекватны.

28. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ

Параметр	$\sigma_{\text{расч}}$	$\sigma_{\text{табл}}$	$S^2_{\text{у}}$	$\bar{y}_{\text{эксп}}$
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

Параметр	$\hat{y}_{\text{расч}}$	Δy	ξ	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$
N_e	16,4433	0,120	0,51	1,125	2,3646
NO_x	2,2874	0,19	0,51	1,822	2,3646
CH_x	0,04667	0,01167	0,51	2,2547	2,3646
C	4,81	0,06	0,51	0,357	2,3646
CO	0,3270	0,1150	0,51	3,485	3,5

Зависимости трехкомпонентных смесей от их состава по уравнениям (55)...(59) показаны на рисунке 64 изолиниями в баричесентрических 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 впуск метанола и воды, а также количества подаваемого ДТ.

Так, при изменении подачи метанола и воды на впуск и ДТ в кодовых переменных от 0 до 1 (рис. 64,а) мощность дизеля меняется 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:

- в точке а: ДТ — 0,8; М — 0,1; В — 0,1;
- в точке б: ДТ — 0,6; М — 0,3; В — 0,1;
- 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 впуск позволяет поддерживать мощность дизеля в определенном интервале даже при значительном снижении расхода ДТ (до нуля в кодовых переменных) и замещении его метанолом.

Совместное влияние подачи метанола и воды на впуск 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;

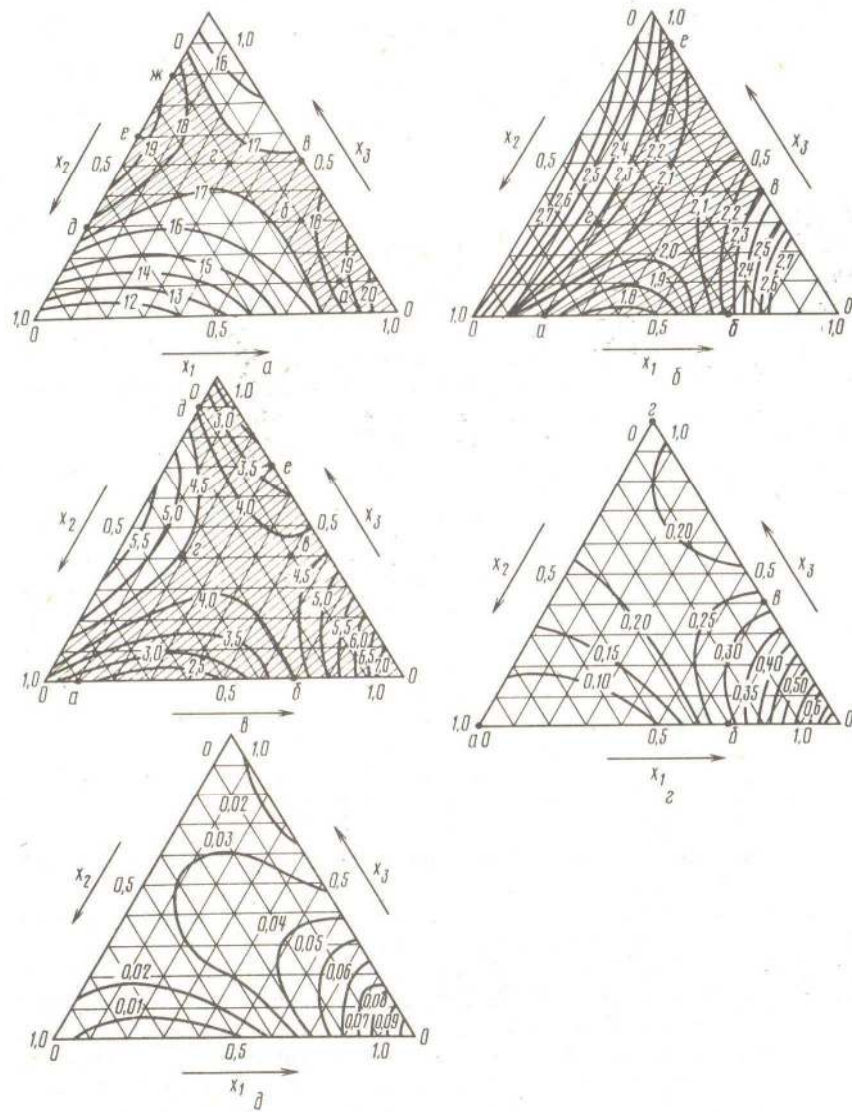


Рис. 64. Диаграммы состав — свойство при подаче метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1 (изолиний свойств в барицентрических координатах): а — для эффективной мощности; б — оксидов азота; в — сажи; г — оксида углерода; д — углеводородов

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 влиянии подачи метанола и воды на впуске и ДТ на содержание сажи в ОГ концентрация сажи изменяется 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 влиянии подачи метанола и воды на впуске и ДТ на содержание в ОГ углеводородов концентрация C_xH_y изменяется от 0,01 до 0,1 мг/л (рис. 64, д), причем концентрация C_xH_y 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 оксиду углерода и углеводородам возможна работа дизеля с замещением ДТ 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

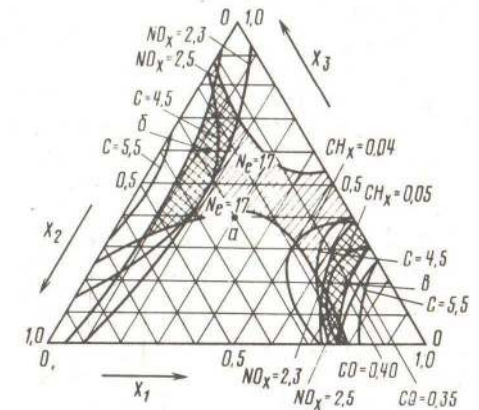


Рис. 65. Ограничения, накладываемые по токсическим показателям на состав смеси (в барицентрических координатах) при оптимизации подачи метанола и воды во впускной трубопровод дизеля Д-21А1

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 влияет NO_x . Увеличение допустимой концентрации NO_x всего на 0,2 мг/л значительно расширяет 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 оксида 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 NO_x , соответствующая содержанию 2,3 мг/л. Эта область имеет следующие ограничения по составам смесей метанола, воды и ДТ: $0,2 \leq \text{ДТ} \leq 0,6$; $0,2 \leq \text{М} \leq 0,7$; $0,1 \leq \text{В} \leq 0,4$.

При рассмотрении ограничений по NO_x в 2,5 мг/л составы смесей для получения мощности более 17 кВт будут иметь следующие ограничения (участок с двойной штриховкой): $0,1 \leq \text{ДТ} \leq 0,7$; $0,1 \leq \text{М} \leq 0,9$; $0,1 \leq \text{В} \leq 0,6$. При этом необходимо отметить, что при работе дизеля на смесях в области, ограниченной $0 \leq \text{ДТ} \leq 0,5$; $0,4 \leq \text{М} \leq 1$; $0,3 \leq \text{В} \leq 1$, ограничения по CH_x и 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; 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. 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: $10 \% \leq \text{ДТ} \leq 100 \%$; $0 \leq \text{М} \leq 90 \%$; $0 \leq \text{В} \leq 50 \%$. Состав триангулированных компонентов для исследования локальных участков диаграмм состав — свойство для дизеля Д-21А1 при работе на метаноле с воспламенением от запальной порции ДТ и подаче воды на впуске представлен в таблице 29.

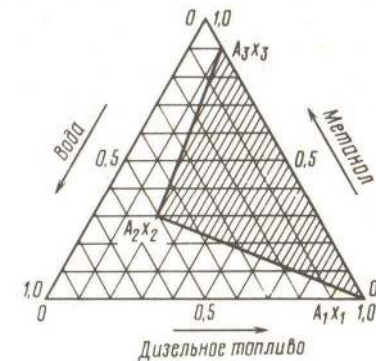


Рис. 66. Расположение триангулированных компонентов и область экспериментирования (заштрихованный участок) при работе дизеля Д-21А1 на метаноле с воспламенением от запальной порции ДТ и при подаче воды во впускной трубопровод

29. СОСТАВ ТРИАНГУЛИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА МЕТАНОЛЕ С ПОДАЧЕЙ ВОДЫ НА ВПУСКЕ

Фактор	Состав смеси, %		
	ДТ	М	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

$$\begin{aligned} \text{ДТ} &= 100x_1 + 20x_2 + 10x_3; \\ \text{В} &= 50x_2; \\ \text{М} &= 30x_2 + 90x_3. \end{aligned} \quad (60)$$

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.

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	ДТ	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 _{1 2}	0,5	0,5	0	60	25	15
5	y _{1 3}	0,5	0	0,5	55	0	45
6	y _{2 3}	0	0,5	0,5	15	25	60
7	y _{1 2 3}	1/3	1/3	1/3	43,3	16,7	40

31. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ЗНАЧЕНИЕ ДИСПЕРСИЙ В ТОЧКАХ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОДАЧИ МЕТАНОЛА НЕПОСРЕДСТВЕННО В КС И ВОДЫ НА ВПУСКЕ

Индекс отклика	Параметры оптимизации (в скобках даны значения S ² _и)	
	N _e	NO _x
y ₁	21,37(0,1533)	3,027(0,0424)
y ₂	0,48(0,0108)	0,180(0,0021)
y ₃	22,65(0,1495)	0,927(0,0046)
y _{1 2}	15,22(0,1236)	0,180(0,0021)
y _{1 3}	18,12(0,1164)	0,990(0,0300)
y _{2 3}	18,62(0,2496)	0,780(0,0171)
y _{1 2 3}	17,46(0,1177)	0,853(0,0036)

Продолжение

Индекс отклика	Параметры оптимизации (в скобках даны значения S ² _и)		
	CH _x	C	CO
y ₁	0,155(0,000163)	7,96(0,0633)	0,756(0,002460)
y ₂	0,038(0,000087)	1,33(0,0652)	0,107(0,000122)
y ₃	0,150(0,000326)	3,90(0,0075)	0,387(0,000598)
y _{1 2}	0,229(0,000275)	4,80(0,0400)	0,427(0,000234)
y _{1 3}	0,301(0,000343)	5,17(0,0809)	0,272(0,001659)
y _{2 3}	0,122(0,000095)	2,78(0,0258)	0,172(0,000605)
y _{1 2 3}	0,277(0,000157)	5,27(0,0409)	0,283(0,000138)

В результате эксперимента (табл. 31) для дизеля Д-21А1 при подаче метанола в КС и воды на впуске получены следующие уравнения неполного третьего порядка:

$$N_e = 21,37x_1 + 0,48x_2 + 22,65x_3 + 17,18x_1x_2 - 15,56x_1x_3 + 28,22x_2x_3 - 21,48x_1x_2x_3 \quad (61)$$

$$NO_x = 3,027x_1 + 0,180x_2 + 0,927x_3 - 5,594x_1x_2 - 3,948x_1x_3 + 0,906x_2x_3 + 12,033x_1x_2x_3 \quad (62)$$

$$CH_x = 0,155x_1 + 0,039x_2 + 0,150x_3 + 0,630x_1x_3 + 0,738x_1x_3 + 0,104x_2x_3 - 0,078x_1x_2x_3 \quad (63)$$

$$C = 7,966x_1 + 1,330x_2 + 3,900x_3 + 0,608x_1x_2 - 3,052x_1x_3 + 0,660x_2x_3 + 28,878x_1x_2x_3 \quad (64)$$

$$CO = 0,756x_1 + 0,107x_2 + 0,37x_3 - 0,018x_1x_2 - 1,198x_1x_3 - 0,300x_2x_3 + 0,939x_1x_2x_3 \quad (65)$$

32. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ

Параметр	G _p	G _T	S ² _y	Y _{расч}
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

Продолжение

Параметр	Y _{расч}	Δy	ξ	t _{расч}	t _{табл}
N _e	18,29	0,83	0,51	3,22	3,50
NO _x	1,025	0,172	0,51	2,0086	2,3646
CH _x	0,302	0,024	0,51	2,3524	2,3646
C	5,62	0,35	0,51	2,3326	2,3646
CO	0,298	0,015	0,51	0,7341	2,3646

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

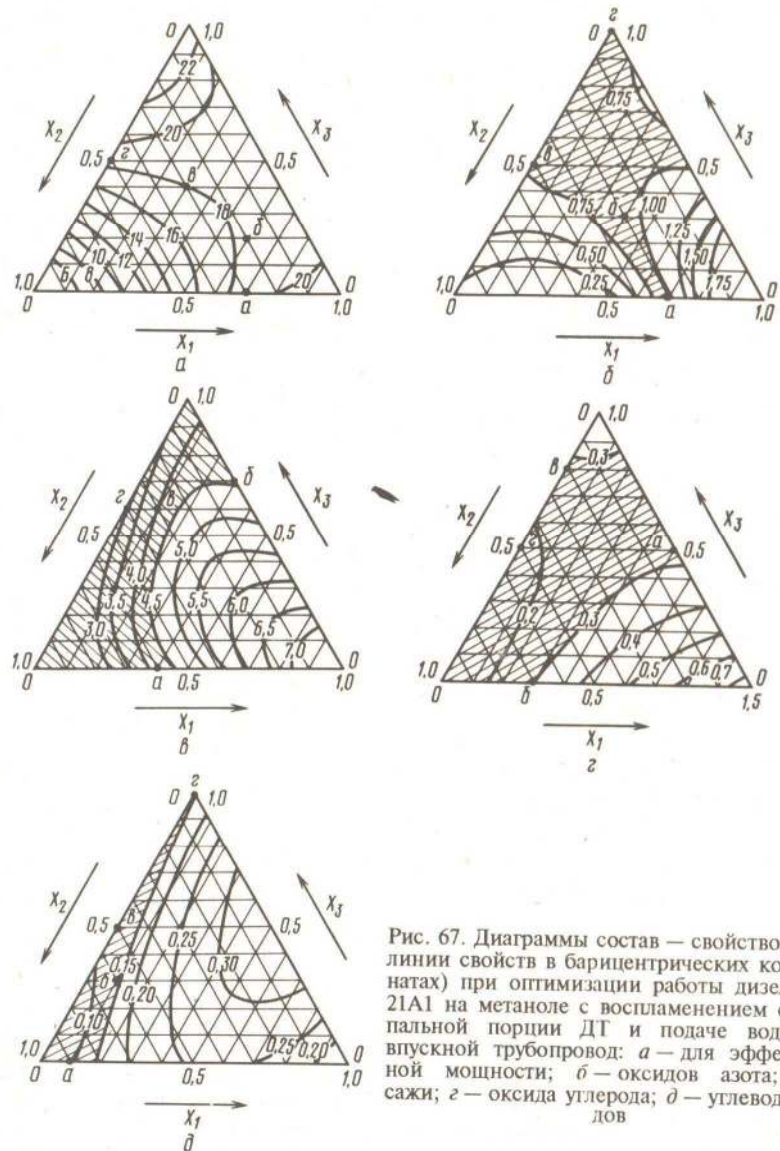


Рис. 67. Диаграммы состав — свойство (изолинии свойств в барицентрических координатах) при оптимизации работы дизеля Д-21А1 на метаноле с воспламенением от запальной порции ДТ и подаче воды во впускной трубопровод: а — для эффективной мощности; б — оксидов азота; в — сажи; г — оксида углерода; д — углеводородов

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 NO_x (рис. 67,б) показывает, что увеличение подачи метанола и воды в смесь способствует снижению содержания NO_x в ОГ дизеля. Состав смеси, соответствующий выбросам 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;
- 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 КС, 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 а, 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 уменьшить при этом содержание сажи в ОГ дизеля. Такое же влияние оказывает изменение состава смеси на содержание СО в ОГ: с увеличением подачи в смесь метанола и воды содержание СО в ОГ дизеля уменьшается (рис. 67,г). При этом если посмотреть на концентрации компонентов в точках а, 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 СН_x в ОГ изменение состава смеси оказывает наиболее сложное влияние (рис. 67,д). Так, увеличение подачи в трехкомпонентную смесь метанола от 0 до 0,5 (в кодовых переменных) способствует повышению содержания СН_x в ОГ, а дальнейшее увеличение — снижение СН_x в ОГ. Заштрихованному участку на рисунке с содержанием СН_x менее 0,15 мг/л и его точкам а, б, в и г также соответствуют различные составы смеси.

Полученные данные говорят о том, что возможно уменьшение содержания СО и СН_x в ОГ дизеля, работающего со снижением 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 саже — менее 4,5 ед. по шкале Боша (участок слева от изолинии); по СО — 0,3 % (участок слева и вверх от изолинии) и по СН_x — менее 0,150 мг/л (участок слева от изолинии).

10.1. Применение сжатого 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. 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 мощности 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 содержание в ОГ сажи. Институтом НАМИ разработан, а завод осуществляет выпуск партий автомобилей КамАЗ с газобаллонным оборудованием, работающих по газодизельному процессу на СПГ, планируется выпуск газобаллонных автомобилей заводами МАЗ, КраЗ, а также Ликинским и Львовским автобусными заводами. В Кировском сельскохозяйственном институте созданы модификации тракторов Т-25А, Т-16МГ, «Универсал-445», погрузчика 17.92, сварочного агрегата АДД-4002 с системами питания, модернизированными для работы на СПГ. Также планируется создание модификации газобаллонных тракторов МТЗ-80 и Т-150К на природном газе.

Методы подачи газа. В дизелях 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 недостаток — 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 подбирают 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 запальной порции ДТ и переключателей вида топлива. Такой 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 на СПГ тяжеловесны, так как в их состав входят баллоны из легированной или углеродистой стали. Давление СПГ в таких баллонах 20...32 МПа, вместимость 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 с подачей газа на такте впуска во впускной трубопровод с воспламенением газозвоздушной 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 ОГ. 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 — определяющее звено в перспективе использования газодизелей в автотракторной технике. Это самый простой путь в реальной замене части ДТ на СПГ. Особенностью газодизельного процесса является то, что в цилиндре дизеля находится газозвоздушная 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 газозвоздушную смесь с помощью штатной топливной аппаратуры подается небольшое количество запальной порции ДТ, которое самовоспламеняется. Самовоспламеняющиеся капли ДТ создают первоначальные очаги воспламенения газозвоздушной смеси не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда и в нескольких местах одновременно. Таким образом, наличие газозвоздушной 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 ДТ 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 (2С 10,5/12) трактора Т-25А на СПГ. В качестве смесителя-дозатора был разработан специальный смеситель (а. с. СССР № 1409768), позволяющий с помощью кольцевой щели равномерно подводить СПГ к диффузору и осуществлять с помощью заслонки регулирование его подачи в широких пределах. Работа по регуляторной характеристике проводилась с помощью специально разработанной системы регулирования подачи СПГ в зависимости от нагрузки и скоростного режима (а. с. СССР № 1709125). Заслонка смесителя и регулятор связаны между собой дополнительной тягой. Запальная порция ДТ подавалась топливным насосом при фиксированном положении дозатора с помощью электромагнитного клапана.

Испытания показали, что дизель устойчиво работает на СПГ при соотношении на номинальном режиме: газа — 80 %, запально-го топлива — 20 %. Исследования рабочего процесса проводились в дальнейшем именно на таком соотношении. Эксперимент показал, что при работе на СПГ 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 θ для частоты вращения 1800 мин⁻¹. 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 0,8 МПа/град. Увеличиваются 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 п.к.в. при дизельном процессе.

Из характеристик тепловыделения дизеля (рис. 69,б) видно, что при работе по газодизельному процессу и увеличении θ 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. — уже 0,1. Наблюдается рост величины полезного выделения теплоты при максимальной усредненной темпера-

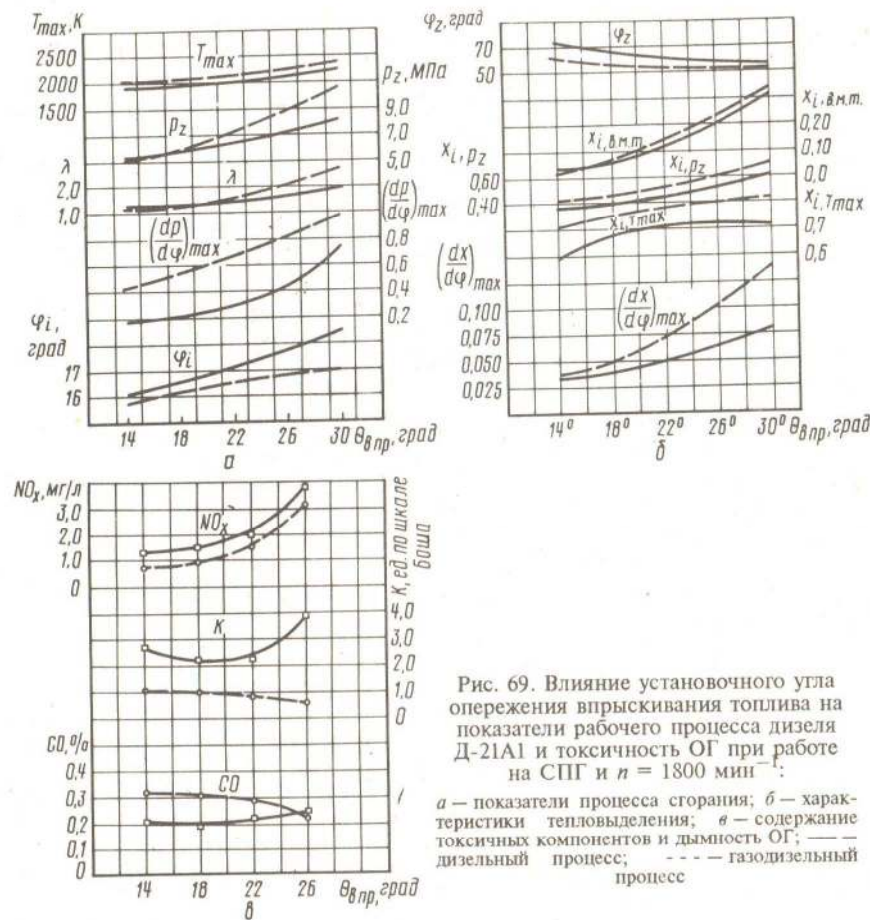


Рис. 69. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива на показатели рабочего процесса дизеля Д-21А1 и токсичность ОГ при работе на СПГ и $n = 1800$ мин⁻¹:

а — показатели процесса сгорания; б — характеристики тепловыделения; в — содержание токсичных компонентов и дымность ОГ; — — — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

туре газов в цилиндре. Вместе с тем значение φ_z при увеличении угла снижается и лежит ниже значений дизельного процесса.

Увеличение показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения на всех исследуемых углах θ объясняется в первую очередь тем, что при работе на СПГ 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 ОГ дизеля при работе на СПГ (рис. 69,в) и изменение θ находятся в определенной зависимости. Если на содержание сажи — угол θ . При увеличении θ и работе на СПГ выход сажи с ОГ не увеличивается.

Индексирование дизеля Д-21А1 при $n = 1800$ мин⁻¹ и опти-

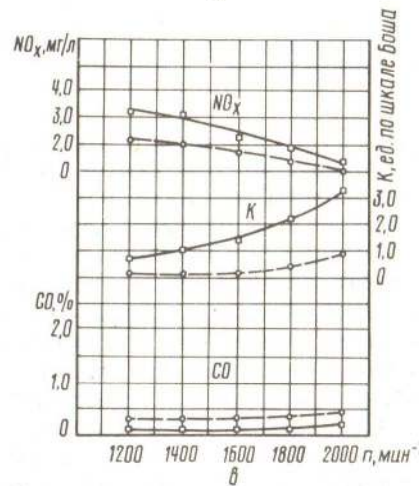
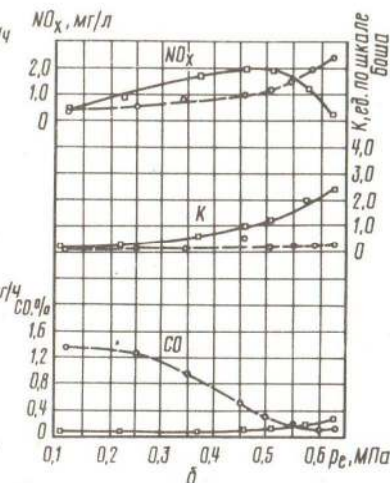
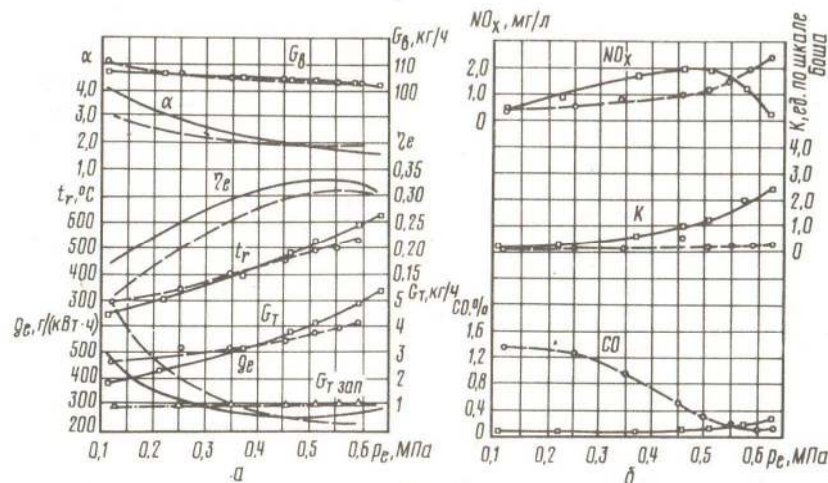


Рис. 72. Влияние подачи СПГ на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1 при $\theta = 22$ град п.к.в.:

a — мощностные и экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при $n = 1800$ мин⁻¹; *б* — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при $n = 1800$ мин⁻¹; *в* — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения; — — — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс; Δ — расход запального ДТ

Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля при работе на СПГ в зависимости от нагрузки показывает, что содержание NO_x (рис. 72,б) снижается при работе по газодизельному процессу на малых нагрузках и выравнивается с дизельным процессом при $p_e > 0,55$ МПа. Содержание сажи снижается в ОГ при работе на СПГ 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 не превышает 0,1...0,2 ед. по шкале Боша. Содержание CO в ОГ при малых нагрузках достигает при газодизельном процессе 1,3 %,

но при значении $p_e = 0,56$ МПа становится равным содержанию CO в ОГ при дизельном процессе. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при работе на СПГ в зависимости от частоты вращения снижается для NO_x и сажи во всем диапазоне частот вращения (рис. 72,в). Так, содержание NO_x в ОГ снижается на 1 мг/л при частоте вращения 1200 мин⁻¹ и на 0,3 мг/л при 2000 мин⁻¹, т. е. эффективность снижается при увеличении частоты вращения. Эффективность снижения содержания сажи при повышении частоты вращения увеличивается; если при 1200 мин⁻¹ содержание сажи в ОГ при работе на СПГ уменьшается на 0,6 ед. по шкале Боша, то при 2000 мин⁻¹ — на 2...3 единицы. Выброс сажи на этой частоте при работе на СПГ не превышает 0,9 ед. по шкале Боша. Одновременно наблюдается некоторое увеличение содержания CO в ОГ. Это увеличение не превышает 0,2...0,25 %.

Модернизация трактора Т-25А для работы на СПГ. В Кировском сельскохозяйственном институте создан опытный образец трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на СПГ. При разработке трактора использовалась серийно выпускаемая газовая аппаратура от газобаллонных автомобилей ЗИЛ-138А и ГАЗ-53-27. Общий вид трактора показан на рисунке 73.

Два баллона из легированной стали вместимостью 50 л и массой 70 кг каждый заполняют СПГ под давлением 20 МПа. Запаса газа хватает на 7 ч работы. В кабине трактора установлены допол-



Рис. 73. Общий вид трактора Т-25А, переоборудованного для работы на СПГ

нительно 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 устанавливают также редуктор, трубопроводы высокого и низкого давления, вентили и другую аппаратуру. Функциональные испытания модернизированного трактора в условиях Кировской области показали возможность широкого использования таких тракторов в хозяйствах, расположенных вблизи газонаполнительных станций, на животноводческих комплексах, в теплицах, складах минеральных удобрений и других сельскохозяйственных помещениях с ограниченным воздухообменом, где необходимо выдерживать требования по загрязнению воздуха рабочей зоны, а также в коммунальном хозяйстве городов и поселков.

Влияние подачи СПГ и установки КН на токсичность ОГ. Как уже рассматривалось ранее, определенный интерес представляет совместное взаимодействие различных методов снижения токсичности ОГ с целью повышения эффективности их использования.

В Кировском СХИ были проведены работы по исследованию влияния подачи СПГ и установки КН на токсичность ОГ дизеля Д-3900 (4 Ч 9,85/12,7) самоходного погрузчика 17.92 производства завода «Васил Коларов» (Болгария). Дизель Д-3900 работал по газодизельному процессу, а в систему выпуска ОГ устанавливался КН типа Н-13 (см. рис. 43, а). Зависимости мощностных, экономических и токсических показателей дизеля Д-3900 от нагрузки при частоте вращения 2400 мин⁻¹ при работе по дизельному и газодизельному процессам с установкой КН представлены на рисунке 74. Из графиков видно, что величина расхода запального ДТ практически не изменялась во всем диапазоне нагрузок (рис. 74, а) и составляла 4,1 кг/ч. На номинальном режиме расход топлива при дизельном процессе составляет 12,4 кг/ч. Величина запального ДТ составляет около 30 %. Эффективный КПД при газодизельном процессе не изменяется во всем диапазоне нагрузок и соответствует КПД дизельного процесса. Температура ОГ при больших нагрузках при газодизельном процессе снижается, однако при малых нагрузках — возрастает. Это — следствие снижения коэффициента наполнения и обогащения смеси на впуске.

Анализ графиков содержания токсичных компонентов показывает, что содержание CO, CO₂ и CH_x (рис. 74, б) выше при работе по газодизельному процессу. Так при $p_e = 0,6$ МПа содержание CO составляет 0,18 % при дизельном процессе и 0,7 % при газодизельном. Вместе с тем установка КН позволяет снизить содержание CO до 0,5 %. При $p_e = 0,6$ МПа содержание CH_x в ОГ составляет при дизельном процессе 0,08 %, при работе по газодизельному процес-

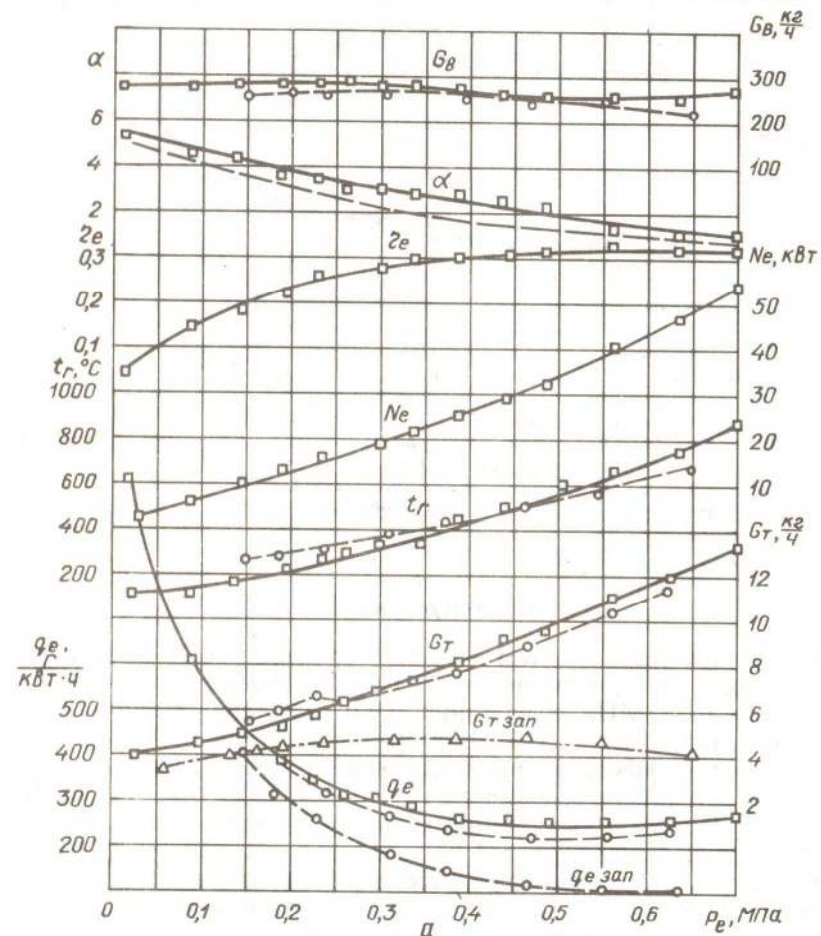


Рис. 74. Влияние подачи СПГ и установки КН на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-3900:

а — мощностные и экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при $n = 2400$ мин⁻¹; б и в — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при $n = 2400$ мин⁻¹; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс с КН; Δ- - - - Δ — газодизельный процесс без КН

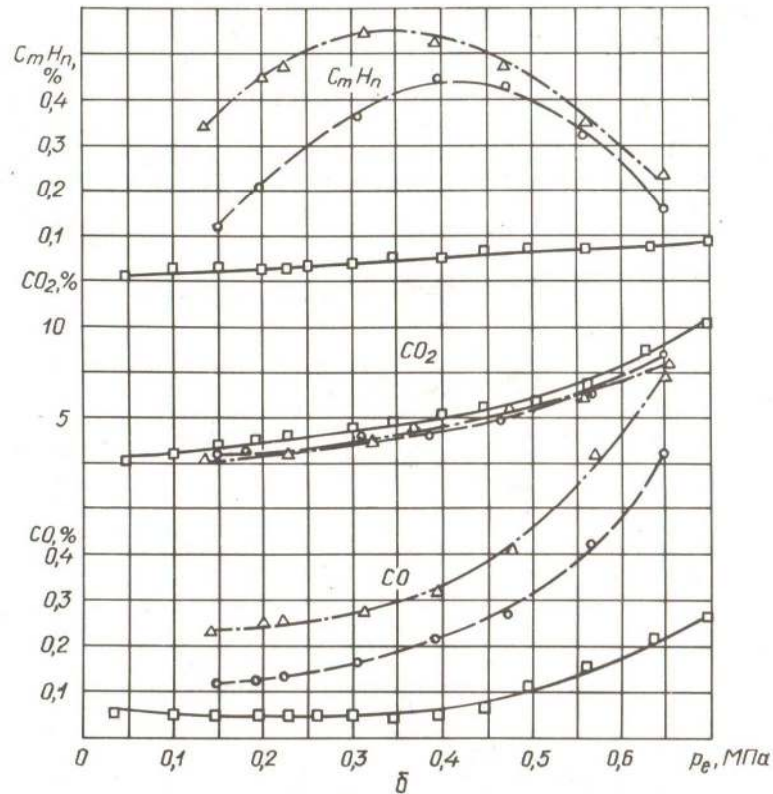


Рис. 74 (продолжение)

су 0,3 %. При установке КН — несколько ниже — 0,28 %. Большой эффект дает КН при работе дизеля на газе и малых нагрузках. Так, при $p_e = 0,15$ МПа содержание в ОГ CH_x при газодизельном процессе составляет 0,35 %, а при установке КН — всего 0,13 %.

Переход на работу по газодизельному процессу оказывает существенное влияние на содержание в ОГ дизеля сажи (рис. 74, ϵ). Так, при $p_e = 0,6$ МПа содержание сажи в ОГ составляет 2,0 ед. по шкале Боша, а при переходе на газодизельный процесс — 1,6 ед. Установка КН позволяет при работе на газе снизить содержание сажи в ОГ до 1,0 ед. по шкале Боша, т. е. снижение составляет 50 %. Содержание оксидов азота в ОГ меняется по сложной зависимости. Если при работе на газе с КН содержание оксидов азота находится примерно на уровне дизельного процесса, то при работе без КН содержание оксидов азота в ОГ возрастает с 200 до 300 ррт.

Для оценки мощностных, экономических и токсических показателей дизеля Д-3900 в зависимости от частоты вращения снима-

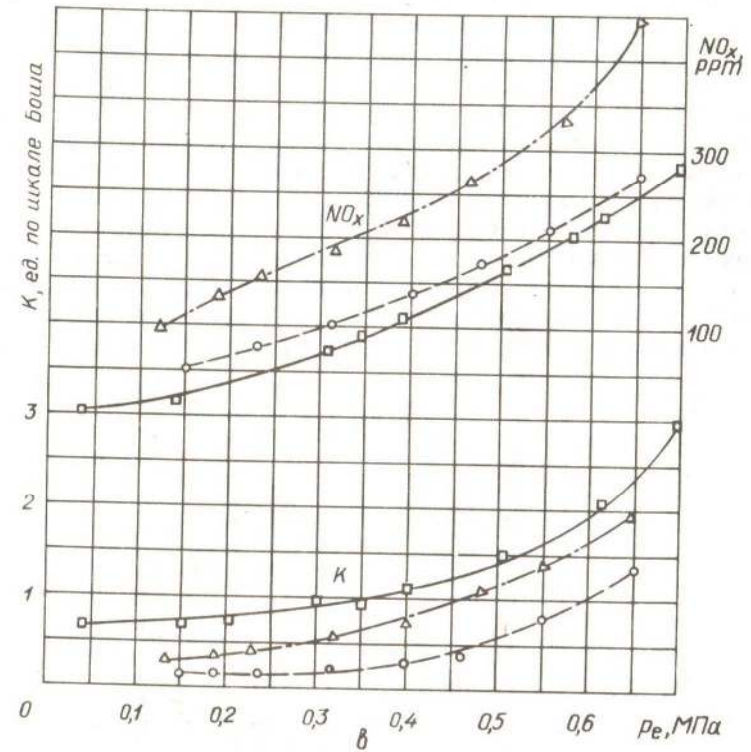


Рис. 74 (продолжение)

лись скоростные характеристики на ДТ со штатной топливной аппаратурой и на СПГ с модернизированной системой питания и КН. Методика предусматривала поддержание одинаковых значений среднего эффективного давления. Результаты исследований представлены на рисунке 75. По характеру изменения графика удельного эффективного расхода топлива (рис. 75, a) видно, что во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля Д-3900 суммарный удельный расход топлива при работе по газодизельному процессу ниже, чем при дизельном. Значения эффективного КПД во всем диапазоне изменения частоты вращения лежат не ниже значений эффективного КПД дизельного процесса.

Суммарный часовой расход топлива газодизельного цикла меньше дизельного на 1,6...1,8 кг/ч. Расход запального ДТ изменяется от 3,2 до 4,2 кг/ч, в то время как при дизельном процессе от 9,2 до 13,5 кг/ч. Снижение составляет более 70 %. При работе на газе, несмотря на отсутствие корректора, характер изменения M_k в зависимости от частоты вращения сохраняется. Из графиков содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-3900 в зависи-

мости от частоты вращения видно, что при работе по газодизельному процессу содержание CO , CO_2 и CH_x (рис. 75, б) увеличивается во всем исследуемом диапазоне частот вращения.

Так, содержание CO при работе по дизельному процессу составляет 0,1...0,2 %, а при газодизельном процессе — 0,3...0,8 %. Установка КН снижает содержание CO до 0,12...0,25 %. Содержание CO_2 увеличивается при работе дизеля на малой частоте вращения и газодизельном процессе до 9 % против 6 % при дизельном. При частоте вращения 2400 мин^{-1} содержание CO_2 практически одинаково на обоих видах топлива. Установка КН снижает содержание CO_2 в ОГ дизеля до 3,5 % на малых частотах вращения. Содержание CH_x выше во всем диапазоне частот вращения при газодизельном процессе и составляет 0,15 % против 0,08 % при дизельном

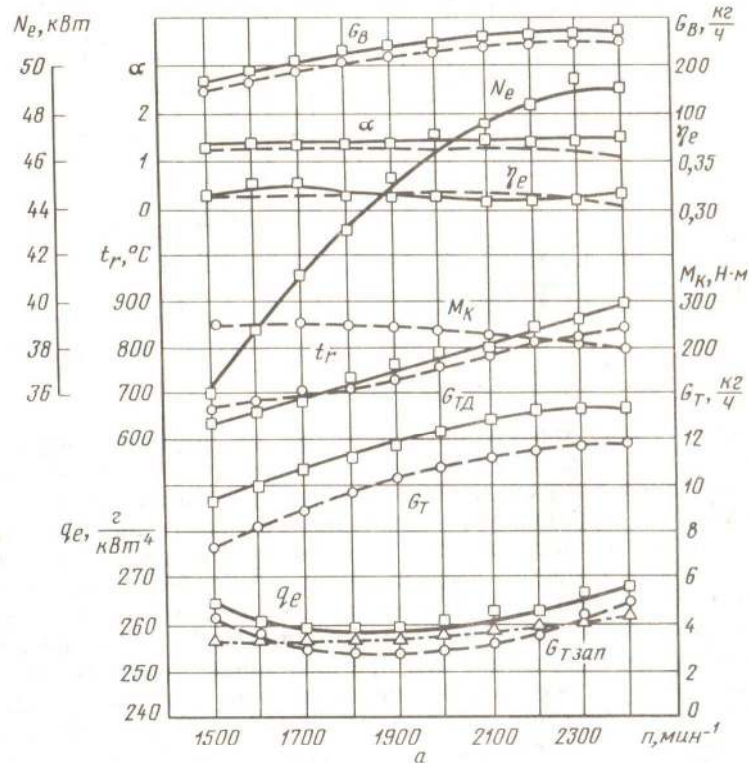


Рис. 75. Влияние подачи СПГ и установки КН на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-3900 при изменении скоростного режима:

а — мощностные и экономические показатели дизеля в зависимости от частоты вращения; б и в — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс с КН; Δ - \cdot - Δ — газодизельный процесс без КН

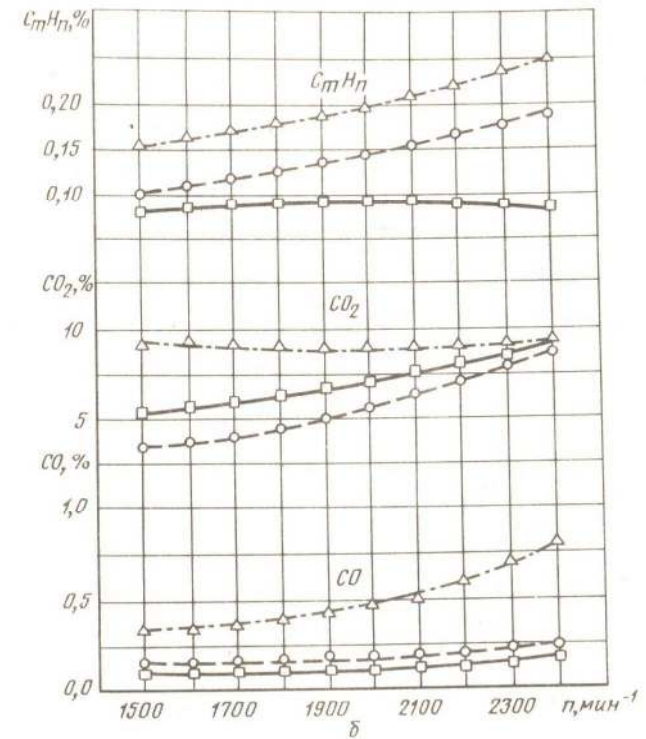


Рис. 75 (продолжение)

при 1500 мин^{-1} и 0,25 % против 0,075 % при 2400 мин^{-1} . Установка КН позволяет снизить содержание CH_x до 0,1...0,18 %.

Содержание сажи при работе по газодизельному процессу снижается во всем диапазоне частот вращения (рис. 75, в). Так, если содержание сажи в ОГ при дизельном процессе составляет 5,0...3,4 ед. по шкале Боша соответственно при частотах вращения 1500 и 2400 мин^{-1} , то при переходе на газодизельный процесс содержание сажи снижается до 3,4...2,01 ед. по шкале Боша. Установка КН позволяет снизить содержание сажи в ОГ до 2,5...0,9 ед. по шкале Боша.

Содержание оксидов азота в ОГ дизеля при работе на СПГ выше, чем при дизельном процессе. Так, при дизельном процессе содержание оксидов азота при частоте вращения 1500 мин^{-1} составляет 0,015 %, а при частоте вращения 2400 мин^{-1} — 0,026 %. При работе по газодизельному процессу содержание оксидов азота составляет уже 0,042...0,044 %. Установка КН снижает содержание оксидов азота до 0,026...0,003 %.

Система питания СПГ дизеля Д-3900 реализована на погрузчике

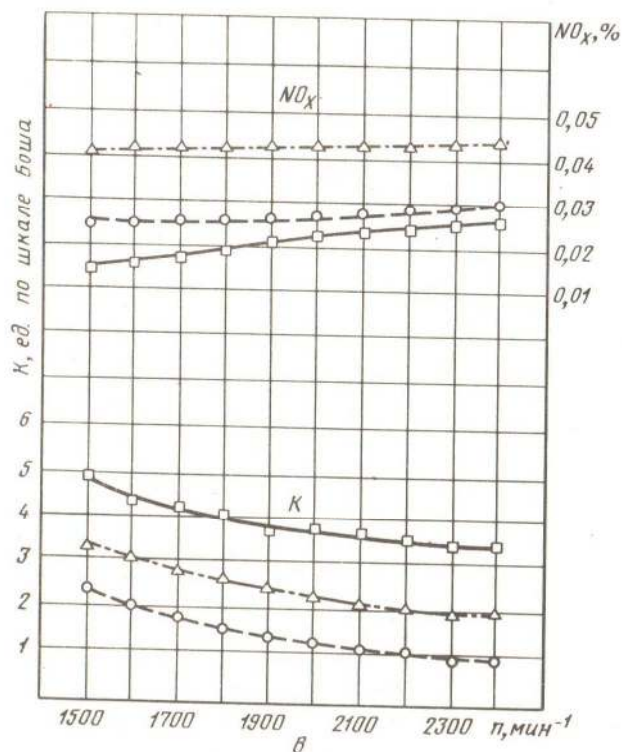


Рис. 75 (продолжение)

17.92 (рис. 76), который используется при разгрузочно-погрузочных работах в помещениях с ограниченным воздухообменом, в первую очередь в складских. Испытания погрузчика 17.92 показали высокую надежность модернизированной системы питания и эффективность совместного применения СПГ и КН для снижения содержания в ОГ дизеля в первую очередь сажи.

Газодизели в странах СНГ 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-6-7Д; для стационарных и передвижных установок — дизель 1Д6-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 на СПГ, закончившихся созданием опытных партий газодизелей, прошедших широкие эксплуатационные испытания, в странах СНГ не проводилось. Единственный в мире завод, выпускающий большими партиями автомобильные газодизели и устанавливающий их на различные модификации автомобилей, — КамАЗ. Планируется перевести на СПГ 213 тыс. автомобилей, из них 82 тыс. с дизелями.

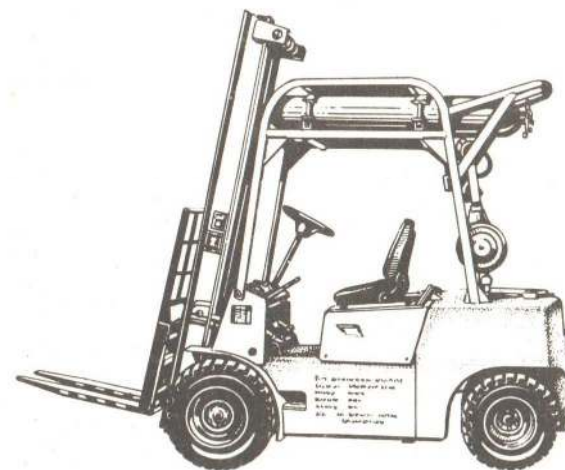


Рис. 76. Общий вид самоходного погрузчика 17.92, переоборудованного для работы на СПГ с КН

Ведущее положение за рубежом в области применения СПГ в качестве моторного топлива для автотранспорта занимает Италия. Ведутся серьезные работы по использованию СПГ в качестве топлива в Германии, 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 СПГ в общем энергетическом балансе страны за счет увеличения использования газа на автотранспорте. Планируются 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-Пилстик», «Зульцер» и др. При этом необходимо отметить, что это фирмы, выпускающие судовые газодизели.

Переводом тракторных дизелей на СПГ серьезно занимаются в Италии. Так, фирма «Тессари» занимается переводом дизелей на СПГ 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 СПГ были подвергнуты четырехцилиндровый дизель с вихревой камерой «Рикардо Комет» МК-5 и серийный дизель объемом 1470 см³ с турбокомпрессором, устанавливаемый на экспериментальный автомобиль «Викинг-4» фирмы «Фольксваген».

В Аризонском университете (США) переведен на СПГ дизель сельскохозяйственного назначения фирмы «Форд». Трехцилиндровый дизель объемом 3300 см³, степенью 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.

10.2. Применение метанола

Возможность использования метанола в качестве топлива для автотракторных дизелей обуславливается в первую очередь тем, что в условиях дефицита ДТ метанол может быть получен из любого газообразного топлива, а также из пищевых и сельскохозяйственных отходов. Метанол (метиловый спирт — CH_3OH) можно отнести к возобновляемым источникам энергии, его в значительных количествах синтезируют из CO и H_2 ($\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$).

Метанол — весьма токсичное соединение, 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 его 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 кДж/кг (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/м³ (при плотности ДТ 830 кг/м³), 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 цилиндры двигателя должно быть введено метанола примерно в 2,3 раза больше, чем ДТ. Для обеспечения одинакового запаса хода автомобиля или трактора 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 его к самовоспламенению может работать только после конструктивных 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. 77). 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.

Процентные отношения подаваемого метанола и ДТ для каждого способа различны. Метанол можно также подавать непосредственно в цилиндр дизеля в виде эмульсии и в 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 необходимо 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, разра-

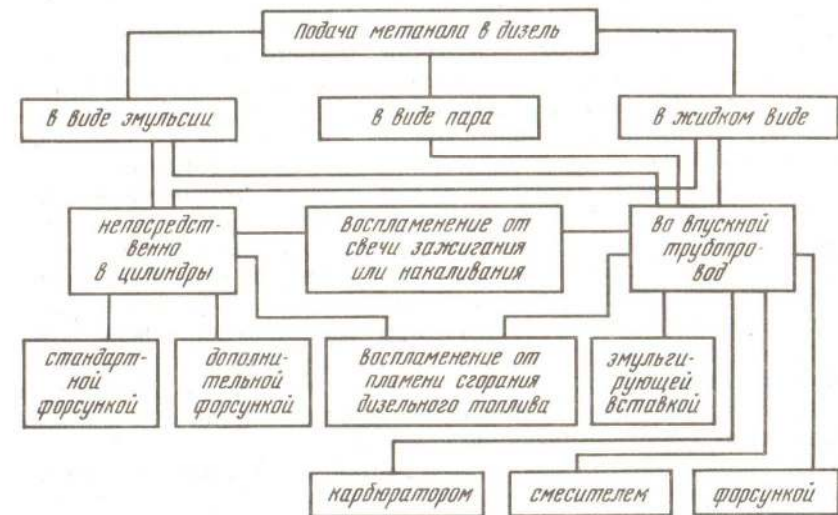


Рис. 77. Способы подачи метанола в дизель

ботанных специально для работы на метаноле, и кончая модернизацией дизелей, выпускающихся серийно и без значительных конструктивных изменений, оборудованных для работы на метаноле.

Подача метанола на впуске с помощью карбюратора. Этот способ — наиболее простой, не требующий серьезных конструктивных изменений и дающий возможность частично заменить ДТ 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 °С. 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 °С. С учетом этого при среднем значении прелитроты сжатия 1,35 получены следующие теоретические температуры конца сжатия при подаче метанола на впуске дизеля: $T_{c15} = 601,4$ °С; $T_{c30} = 587,5$ °С; $T_{c40} = 578,7$ °С; $T_{c50} = 569,7$ °С, 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 порождать новые активные центры. Повышение 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.

При испытаниях дизеля Д-21А1 метанол подавался во впускной трубопровод с помощью карбюратора с регулируемым жиклером, что позволило изменять его количество, подаваемое в цилиндры дизеля. В связи с тем что в задачу исследования входило определение возможных пределов замещения ДТ метанолом, методика предусматривала при снятии характеристик изменение по-

дачи ДТ в цилиндры через ТНВД и форсунку и увеличение подачи метанола при условии поддержания мощностных показателей дизеля на прежнем уровне. Инициирование дизеля проводилось при равных средних эффективных давлениях.

Результаты исследования инициирования дизеля при подаче метанола на впуске приведены на рисунке 78, а. С увеличением количества подаваемого метанола угол, соответствующий периоду задержки воспламенения $\varphi_{д}$, увеличивается. Так, если у серийного дизеля при частоте вращения $n = 1800$ мин⁻¹ значение $\varphi_{д} = 26$ град п.к.в., то при подаче 15 % метанола на впуске он составляет уже 27,5 град п.к.в., а при подаче 30 % — 29 град п.к.в. Вследствие этого возрастает и «жесткость» сгорания.

При работе по дизельному процессу $(dp/d\varphi)_{max} = 0,496$ МПа/град, с подачей 15 % метанола на впуске $(dp/d\varphi)_{max} = 0,565$ 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

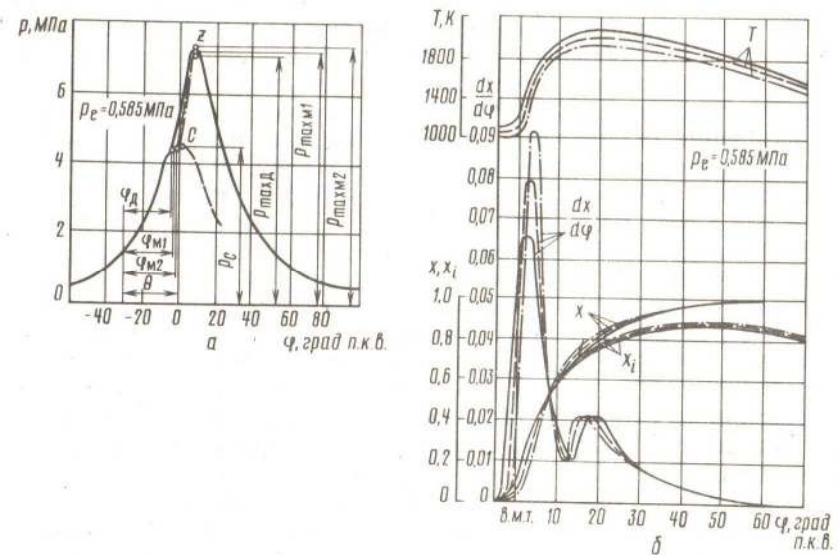


Рис. 78. Влияние подачи метанола на впуске на индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделений дизеля Д-21А1 при $n = 1800$ мин⁻¹: а — индикаторные диаграммы; б — графики динамики выделения теплоты dx , усредненной температуры T газов в цилиндре, скорости отвода теплоты x и полезного выделения теплоты x_i в функции угла поворота коленчатого вала; — — — дизельный процесс; - - - - с подачей 15 % и - · - · - - 30 % метанола на впуске

метанола на впуске 40 % 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 $p_{\max \text{ д}} = 7,25 \text{ МПа}$, $p_{\max \text{ м1}} = 7,29 \text{ МПа}$ и $p_{\max \text{ м2}} = 7,35 \text{ МПа}$.

Из результатов обработки индикаторных диаграмм, проведенных с использованием ЭВМ ЕС-1020, видно (рис. 78, 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 — $1669 \text{ }^\circ\text{C}$.

По характеру 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 в.м.т. 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 % — 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 % — 0,0923. В результате уже при $\varphi = 7,5$ град п.к.в. 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 п.к.в. доля активного тепловыделения составляет 0,72...0,73 при работе как на одном ДТ, так и с подачей метанола на впуске. Таким образом, процесс сгорания для всех этих случаев заканчивается одновременно при $\varphi = 63$ град п.к.в. Повышение максимальной скорости тепловыделения при работе с подачей метанола на впуске связано с увеличением периода задержки воспламенения.

Анализ результатов индицирования дизеля показывает, что метанол нецелесообразно подавать на впуске в количестве более 30 %, и поэтому все дальнейшие исследования проводились с учетом этого ограничения.

На рисунке 79, а представлены нагрузочные характеристики дизеля 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 кг/ч, т. е. снижение расхода ДТ за счет замены его метанолом составляет 13 %. Удельный эффективный расход топлива увеличивается: для дизельного процесса $g_e = 242 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$, при подаче 15 % метанола на впуске — 264 г/(кВт · ч) и при подаче 30 % метанола — 275 г/(кВт · ч).

Увеличение часового и удельного эффективных расходов топлива объясняется тем, что теплота сгорания метанола в 2,2 раза ниже, чем у ДТ.

Из характера протекания кривой эффективного КПД η_e , кото-

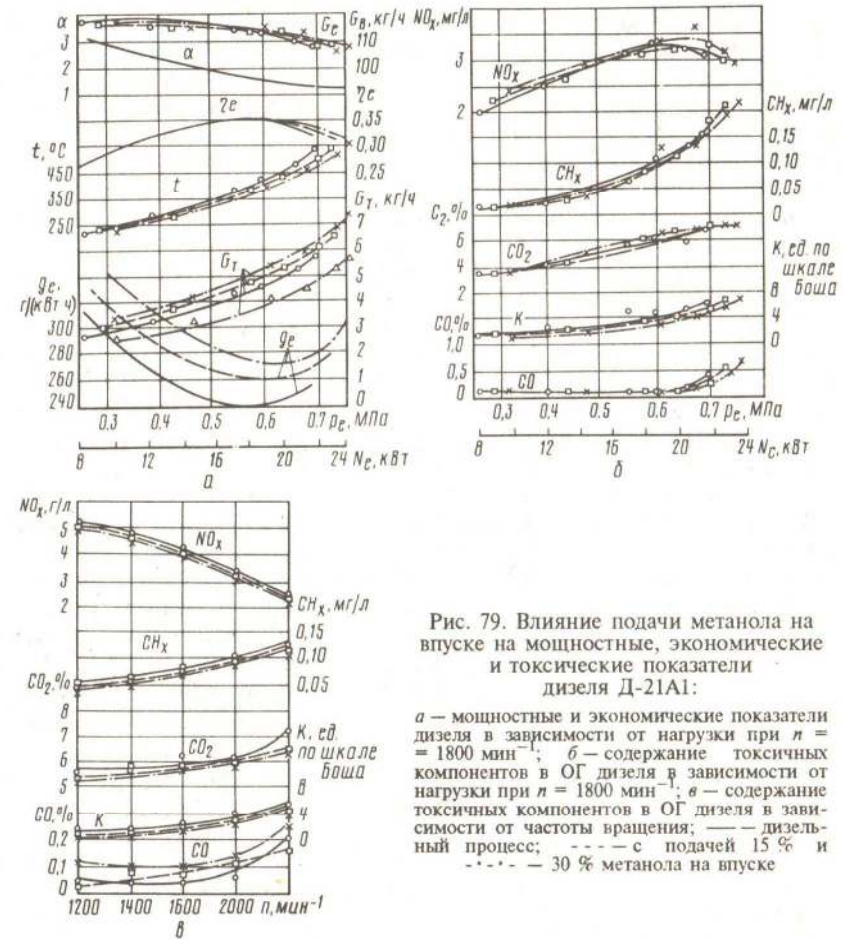


Рис. 79. Влияние подачи метанола на впуске на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1:

а — мощностные и 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; - - - с подачи 15 % и - · - · - 30 % метанола на впуске

рый 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, более эффективном сгорании ДТ в среде сжатой метаноловоздушной смеси, чем в воздухе. Минимум удельного эффективного расхода топлива при подаче метанола сдвигается в сторону больших нагрузок. Если при дизельном процессе g_{emin} достигается при $p_e = 0,585$ МПа, то с подачей 15 % метанола при $p_e = 0,625$ МПа и с подачей 30 % метанола — при 0,635 МПа. Очевидно, что на больших нагрузках в условиях высоких температур метанол диссоциирует на активные радикалы: $CH_3OH \rightarrow CH_3 + OH$, 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 $n = 1800$ мин⁻¹ показано на рисунке 79, 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 $n = 1800$ мин⁻¹ содержание 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 NO_x при подаче метанола сдвигается в сторону больших нагрузок. Согласно термической природе образования оксидов азота следовало бы ожидать уменьшения содержания 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 NO_x , образующихся при сгорании, находится в зависимости от скоростей тепловыделения и нарастания давления. Результаты индцирования показали увеличение скоростей тепловыделения и нарастания давления в процессе сгорания при подаче метанола на впуске. Таким образом, несмотря на меньшую температуру газов в цилиндре, количество 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 $p_e = 0,59$ МПа содержание сажи при дизельном процессе составляет 4,6 ед. по шкале Боша, при подаче 15 % метанола на впуске — 3,8, 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 20 и 40 % по сравнению с дизельным процессом. При этом необходимо 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, 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 79, 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⁻¹ до 2,4 мг/л при $n = 2000$ мин⁻¹). 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⁻¹ концентрация их в ОГ дизеля одинакова при дизельном процессе и работе с подачей метанола.

Содержание сажи на всех частотах вращения с подачей метанола на впуске снижается. Причем если при $n = 1800$ мин⁻¹ это снижение составляло 35...40 %, то на частоте 1200 мин⁻¹ — 40 % при подаче 15 % метанола и 70 % — при подаче 30 % метанола на впуске. Таким образом, положительное влияние подачи метанола во впускной трубопровод на снижение содержания сажи 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 дизелей 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⁻¹, с неразделенной КС и наддувом было исследова-

но 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 впрыскивался 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 в.м.т.; впрыскивание всей дозы метанола при закрытых клапанах с моментом начала впрыскивания при 360 град п.к.в. в в.м.т. 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⁻¹ наблюдаются нарушения процесса сгорания из-за появления детонационных стуков. Многоструйное впрыскивание метанола с разделением дозы на две части на каждом обороте коленчатого вала — наиболее надежное.

Способы, влияющие на содержание токсичных компонентов в ОГ, мало чем отличаются один от другого. Общие закономерности

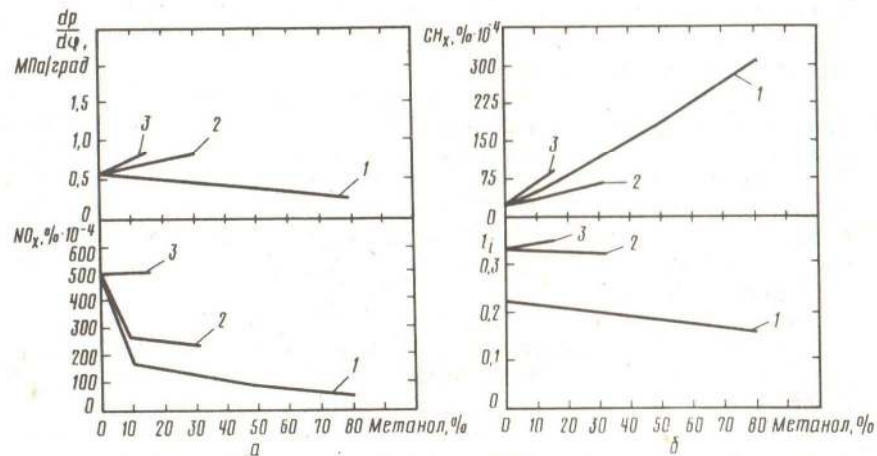


Рис. 80. Изменение показателей работы дизеля при впрыскивании метанола с помощью форсунки в зависимости от его количества:

a — изменение скорости нарастания давления в цилиндре и относительное изменение содержания NO_x в ОГ; *b* — 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

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 зависимости от нагрузки и количества подаваемого метанола представлено на рисунке 80. Содержание NO_x и CH_x дано в соотношении к содержанию NO_x и CH_x при дизельном процессе. Из графиков видно, что если содержание NO_x при подаче метанола снижается от 10 до 100 %, то содержание CH_x увеличивается по сравнению с дизельным процессом от 2...2,5 раза 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 оксида углерода: $CH_3OH \rightarrow 2H_2 + CO$.

При утилизации теплоты охлаждающей жидкости и ОГ в данной эндотермической реакции появляется необходимость увеличить на 15...17 % выделение теплоты по сравнению с нижней теплотой сгорания исходного продукта — метанола. При испытаниях 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. Теплота ОГ утилизировалась и использовалась для испарения метанола. При подаче продуктов разложения метанола было получено улучшение экономических показателей (табл. 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 ДТ 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, CH_x и NO_x (рис. 81) по сравнению с дизельным процессом не изменился. Вместе с тем концентрация сажи в ОГ снизилась в 3 раза во всем диапазоне нагрузок при добавлении 50 % метанола. Несколько увеличилось содержание CO. Концентрация NO_x осталась без изменений, CH_x — уменьшилась в 4...5 раз в области средних нагрузок, оставаясь в первом приближении без изменений на нагрузках, близких к холостому ходу и номинальной.

Анализ индикаторных диаграмм показал, что присадка продуктов разложения метанола повышает 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 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 КН. При установке на агрегат дизель с раздельной подачей жидкого топлива и продуктов разложения метанола

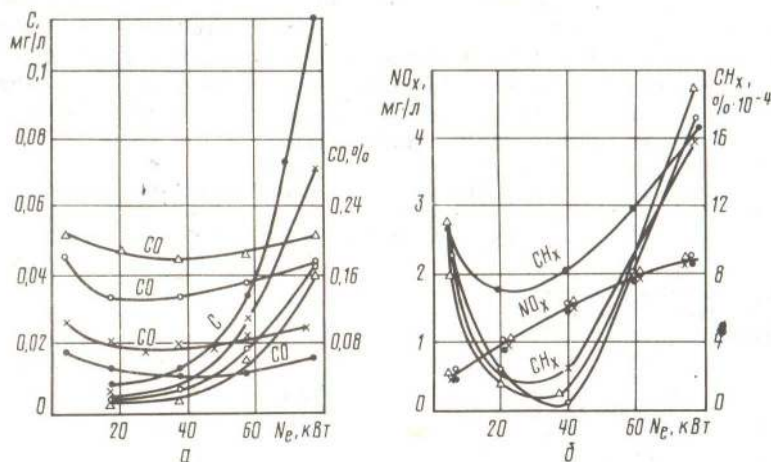


Рис. 81. Влияние подачи метанола в диссоциированном виде на впуске дизеля на токсичность ОГ в зависимости от нагрузки: а — для сажи и NO_x; б — для CH_x и NO_x; • — дизельный процесс; ×, о и Δ — при подаче метанола в количестве 10, 30 и 50 % соответственно

может эксплуатироваться как на традиционном топливе, так и с присадкой метилового спирта без изменения регулировок.

Подача метанола с помощью двойной системы топливоподачи 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 дополнительную систему питания впрыскивать в цилиндр лишь запальную дозу ДТ.

Этот метод имеет ряд преимуществ: значительную экономию нефтяного топлива, отсутствие серьезных конструктивных изменений, что позволяет использовать существующие двигатели, эффективное снижение токсичности ОГ, особенно по NO_x и саже.

Принципиальная схема двойной системы топливоподачи приведена на рисунке 82.

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 шпильки в отверстии головки, просверленном ниже места установки основной форсунки, но в одной с ней вертикальной плоскости, установлена дополнительная штифтовая форсунка ФШ6-2 × 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 осуществлялись 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 постоян-

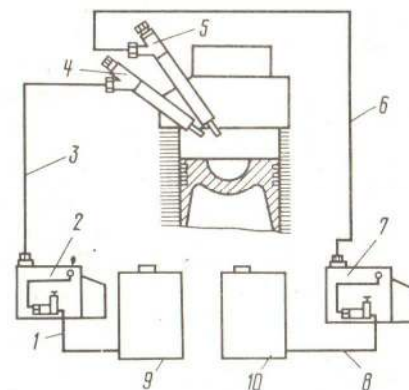


Рис. 82. Принципиальная схема двойной системы топливоподачи метанола в цилиндры дизеля:

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

ной, 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. 83, а) на частоте вращения $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ значение $p_{\max д} = 7,25 \text{ МПа}$, а при работе на метаноле $p_{\max м} = 6,58 \text{ МПа}$. 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. 83, 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 $T_{\max д} = 2103 \text{ К}$ и наблюдается при $\varphi = 20 \text{ град п. к. в.}$, а при работе на метаноле $T_{\max м} = 2075 \text{ К}$ при $\varphi = 32 \text{ град п. к. в.}$ Начиная с угла $\varphi = 28 \text{ град п. к. в.}$, значения температуры цикла двигателя, работающего на метаноле, выше, чем у серийного дизеля.

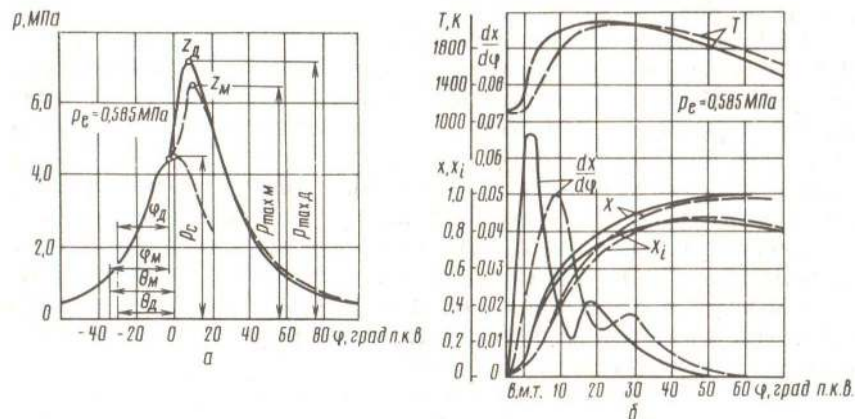


Рис. 83. Влияние подачи метанола с помощью двойной системы топливоподачи на индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля Д-21А1 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$.

а — индикаторные диаграммы; б — графики динамики выделения теплоты dx , усредненной температуры газов T в цилиндре, скорости отвода теплоты x и полезного выделения теплоты x_i в функции угла поворота коленчатого вала; — — дизельный процесс; - - - с подачей метанола

Для дизеля, работающего на метаноле с воспламенением от запальной порции ДТ, 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 $(dx/d\varphi)_{\max} = 0,066$ наблюдается при $\varphi = 2 \text{ град п. к. в.}$, то для дизеля, работающего на метаноле, $(dx/d\varphi)_{\max} = 0,499$ при $\varphi = 7,5 \text{ град п. к. в.}$

Из графиков 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 $\varphi = 7 \text{ град п. к. в.}$ При работе на метаноле значению p_{\max} соответствует почти такое же значение $x_i = 0,45$, но достигается оно уже при $\varphi = 10,5 \text{ град п. к. в.}$ Во второй фазе при угле $\varphi = 20 \text{ град п. к. в.}$, соответствующем максимальной осредненной температуре цикла, $x_i = 0,72$ для серийного дизеля, а для работающего на метаноле дизеля при $\varphi = 32 \text{ град п. к. в.}$, 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 $\varphi = 5 \text{ град п. к. в.}$ Сгорание в результате заканчивается почти одновременно с разницей в 4 град п. к. в. ($\varphi_d = 62 \text{ град п. к. в.}$, а $\varphi_m = 66 \text{ град п. к. в.}$).

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 — это также причина уменьшения 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 84, а показаны нагрузочные характеристики дизеля при работе на ДТ и метаноле при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$. Из графиков 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 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,585 \text{ МПа}$ $G_T = 4,5 \text{ кг/ч}$, а у дизеля, работающего на метаноле с подачей запальной порции ДТ, суммарный расход топлива $G_{\Sigma} =$

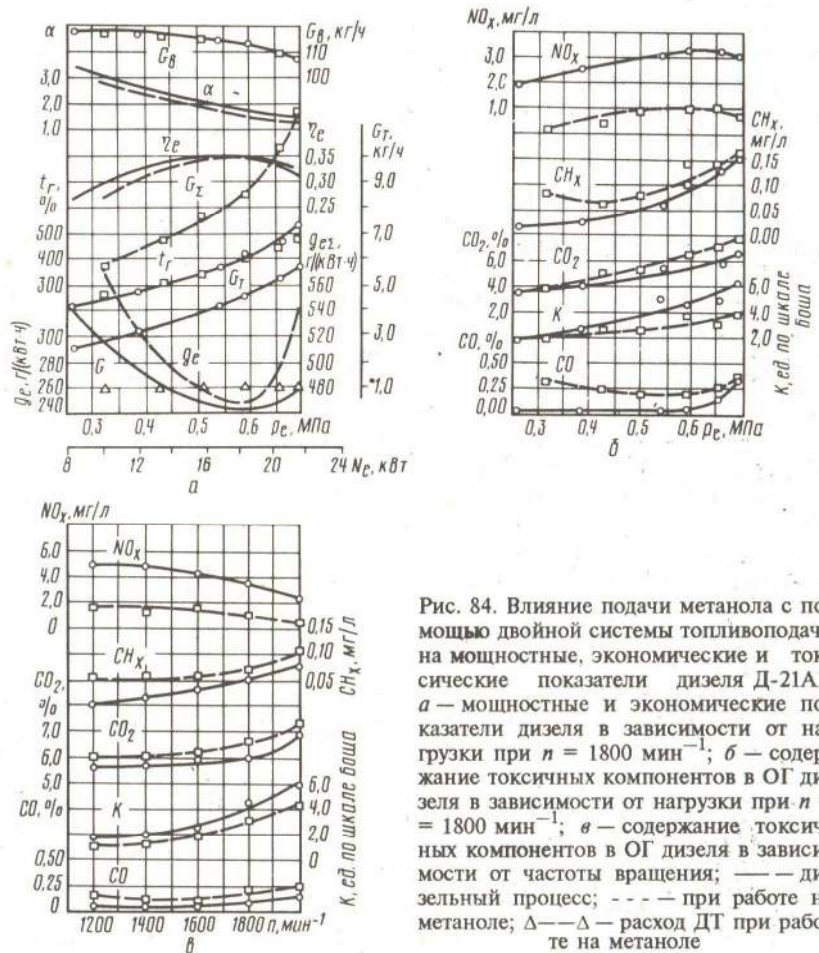


Рис. 84. Влияние подачи метанола с помощью двойной системы топливоподачи на мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-21А1; а — мощностные и экономические показатели дизеля в зависимости от нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б — содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в 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; Δ — Δ — расход ДТ при работе на метаноле

$= 8,5 \text{ кг/ч}$. При этом расход запального топлива $G_{\text{Д.з}}$, 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 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 кг/ч , составит лишь 9,6 %. При сравнении с расходом топлива серийным дизелем 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 $g_{e \text{ min} \Sigma} = 470 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ против $g_{e \text{ min}} = 240 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$. Это объясняется низкой теплотой сгорания метанола по отношению к ДТ. Эффективный КПД η_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 дизелем в зависимости от нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, а также от скоростного режима показаны на рисунке 84, 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 NO_x в ОГ при работе дизеля на ДТ увеличивается с 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 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 NO_x в ОГ снижается при работе на метаноле с 3,25 до 1 мг/л, в 3,25 раза.

Резкое снижение содержания NO_x в ОГ объясняется тем, что скорости 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 — определяющие в образовании NO_x при сгорании топливоздушная 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, а при работе на метаноле — с 2 до 3,8 ед. по шкале Боша.

Таким образом, на малых нагрузках разница в содержании сажи в ОГ при работе на различных топливах возрастает и при максимальных значениях достигает 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 (CH_x , CO_2 и 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, содержа-

ние CH_x в ОГ при $p_e = 0,69$ МПа и $n = 1800$ мин⁻¹ составляет 0,170 мг/л при работе на метаноле и 0,160 мг/л — на ДТ. Содержание СО в обоих случаях при этой же нагрузке составляет 0,35 % по объему. Содержание 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 NO_x , содержание которых снижается при работе на ДТ с 4,8 мг/л при $n = 1200$ мин⁻¹ до 2,4 мг/л при $n = 2000$ мин⁻¹. При работе на метаноле содержание NO_x снижается с 1,6 мг/л при $n = 1200$ мин⁻¹ до 0,6 мг/л при $n = 2000$ мин⁻¹. Как видно из графиков (см. рис. 84, б и в), снижение содержания NO_x в ОГ при работе дизеля на метаноле характерно для всех исследуемых частот вращения. В процентном отношении снижение содержания NO_x в ОГ при $n = 1200$ мин⁻¹ составляет 66,6 %, а при 2000 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 CH_x , CO_2 , СО при работе на метаноле по сравнению с серийным дизелем. Однако в количественном отношении увеличение содержания токсичных компонентов мало. Так, для CH_x это увеличение составляет для $n = 1200$ мин⁻¹ 0,05 мг/л, а при 1800 мин⁻¹ — всего 0,025 мг/л. Для СО увеличение составляет при работе дизеля на метаноле при $n = 1200$ мин⁻¹ 0,125 %, а при 1800 мин⁻¹ — 0,11 %. Для CO_2 увеличение при $n = 1200$ мин⁻¹ равно 0,4 %, а при 1800 мин⁻¹ — 0,6 %.

На дизелях Д-21А1 с полусферической КС при подаче метанола непосредственно в КС с помощью двойной системы топливоподачи возможно получение мощностных показателей на уровне серийного дизеля при использовании до 10 % запального ДТ 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 топливоподачи 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 топливоподачи не требуются значительные конструктивные изменения, и она может быть реализована на дизелях, находящихся в эксплуатации.

В Кировском СХИ на основе двойной системы топливоподачи 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 допол-



Рис. 85. Общий вид трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на метаноле

нительный бак под капотом трактора вместимостью 10 л. Воздухоочиститель при этом вынесен слева от кабины. Общий вид трактора показан на рисунке 85.

Подача метанола в цилиндры дизеля в виде метанолотопливных эмульсий (МТЭ). Наиболее простой, дешевый и доступный способ применения метанола — использование его в виде эмульсии с ДТ. Этот способ не требует значительных затрат на внесение конструктивных изменений и может быть реализован на двигателях, уже находящихся в эксплуатации.

Для приготовления МТЭ с высокой стабильностью необходимо выбрать поверхностно-активные вещества (ПАВ) — широкодоступные и дающие значительный эффект, а также определить оптимальную концентрацию вводимой в эмульсию воды.

Исследования, проведенные в Кировском СХИ, позволили получить значения полной стабильности МТЭ для некоторых эмульгаторов. В таблице 34 показано влияние воды на стабильность МТЭ. Кроме перечисленных в таблице исследовались также в качестве ПАВ бутанол, олеиновая кислота, ФП-56а и сукцинимид.

Анализ ПАВ показал, что бутанол и олеиновая кислота могут использоваться только в случае приготовления МТЭ непосредственно перед подачей в цилиндры дизеля. Такие же низкие стабилизирующие свойства и у ФП-56а.

34. ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА СТАБИЛЬНОСТЬ МТЭ

Концентрация метанола в МТЭ, %	Концентрация воды в метаноле, %	Стабильность МТЭ (мин), содержащих эмульгаторы				
		Пентол	ТЭП-101	Нефтяной сульфат	Эдималь	Амикром
20	5	1,5	6,5	12,0	9,5	3,0
	10	2,0	10,0	10,0	8,0	5,0
	15	3,0	12,0	10,0	8,0	9,5
	20	5,0	13,0	8,0	7,0	12,0
30	5	1,0	3,0	5,0	4,5	2,0
	10	3,0	3,0	5,0	4,0	3,0
	15	3,0	3,0	5,0	4,0	7,0
	20	3,5	3,5	5,0	3,0	9,5
40	5	1,0	2,0	3,0	2,0	1,0
	10	1,0	3,0	2,5	2,5	1,0
	15	1,0	3,5	2,5	2,5	2,0
	20	1,5	3,5	3,0	3,5	2,0

Стабильность МТЭ, содержащих пентол, прямо пропорциональна количеству вводимого эмульгатора и обратно пропорциональна содержанию метанола в эмульсии. Эффективность ТЭП-101 значительно выше. Для обеспечения стабильности МТЭ, содержащей 30 % метанола, в течение 5 мин достаточно 1 % этого ПАВ. С уменьшением количества метанола это время возрастает в несколько раз.

Влияние нефтяного сульфата на стабильность МТЭ противоположно. Увеличение его концентрации снижает стабильность МТЭ. Но вместе с ростом присутствия метанола эта тенденция ослабевает, и изменение количества ПАВ от 0,5 до 2,0 % практически не изменяет стабильности состава.

Эдималь влияет на стабильность МТЭ неоднозначно. Увеличение ПАВ снижает стабильность низкоконцентрированных МТЭ, но эффективно воздействует на МТЭ, содержащие 20 % метанола и выше. В этом случае 2 % присадки обеспечивает стабильность в течение 10...20 мин.

Амикром малоэффективен для МТЭ с большим содержанием метанола. Снижение количества метанола до 10 % дает стабильность в МТЭ в течение 25...30 мин, а стабильность 5 % МТЭ достигает 24 ч.

Наилучшие показатели по стабильности МТЭ дает использование в качестве присадки сукцинимид (рис. 86). Из результатов исследования видно, что даже добавление 0,5 % сукцинимид позволяет при 40 % метанола в МТЭ добиться стабильности более 5 ч. Стабильность МТЭ, приготовленных в этих исследованиях, прямо

пропорциональна содержанию ПАВ и обратно пропорциональна содержанию в них метанола. Наибольшую стабильность имела проба МТЭ с 5 % метанола и 2 % эмульгатора — 36 ч. Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения сукцинимид в качестве эмульгатора для приготовления МТЭ вне топливной системы дизеля.

Влияние воды на стабильность МТЭ с сукцинимидом показано на рисунке 87.

Как видно из графика, сукцинимид — это высокоэффективный эмульгатор, действие которого усиливается с увеличением количества вводимой в метанол воды, что очень важно при применении метанола-сырца. Так, увеличение содержания воды с 5 до 20 % в МТЭ с содержанием 40 % метанола повышает стабильность с 2 до 18 ч. Эта тенденция не нарушается и в остальных случаях.

С учетом антикоррозионных свойств, стабильности, смазывающих свойств и возможности использования воды в Кировском СХИ разработана МТЭ (а. с. СССР № 1728290), содержащая 5...40 % метанола, до 10 % воды, 0,25...0,5 % сукцинимид, 0,25...0,5 % жидкого мыла — стеарита калия и ДТ.

Полная стабильность такой МТЭ достаточна к применению

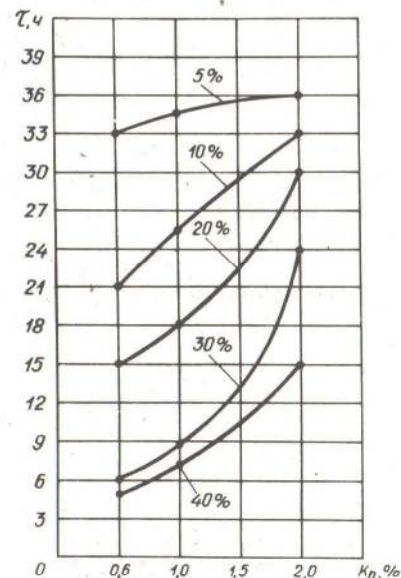


Рис. 86. Влияние присадки сукцинимид на стабильность МТЭ:

К_п — содержание присадки в %; 5, 10, 20, 30 и 40 % — содержание метанола в МТЭ

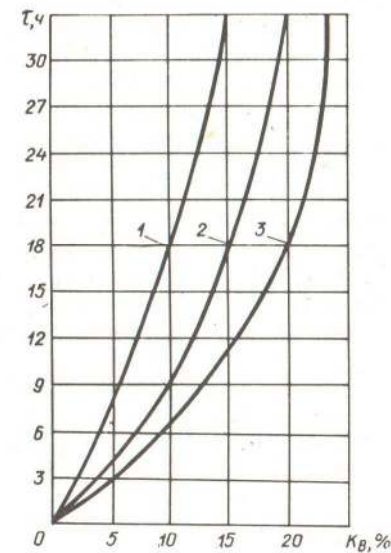


Рис. 87. Влияние воды на стабильность МТЭ (Эмульгатор — сукцинимид в количестве 1,0 %):

1 — 20 % метанола; 2 — 30 % метанола; 3 — 40 % метанола; К_в — содержание воды в %

даже при заблаговременном приготовлении, поскольку время до полного разделения состава на углеводородную и метанольную фазы составляет от 5 до 7 сут. При этом МТЭ имеет хорошие смазывающие и противоизносные свойства.

Схемы приготовления МТЭ. При работе дизелей на МТЭ приготовление ее может осуществляться вне топливной системы заблаговременно, но лишь на высокостабильных эмульсиях. Использование малостабильной эмульсии возможно лишь при условии ее образования в топливной системе дизеля. Технические решения этого способа достаточно многообразны.

Регулирование состава МТЭ может быть осуществлено применением схемы, изображенной на рисунке 88. Способ (а. с. СССР № 842210) основан на волновом процессе в линии высокого давления и состоит в следующем: при отсечке подачи насосом его нагнетательный клапан своим разгрузочным пояском формирует в линии высокого давления волну разрежения. В период между впрыскиваниями волна разрежения многократно открывает обратный клапан и способствует поступлению и смешиванию добавочного топлива с ДТ.

В Кировском СХИ разработана и успешно прошла испытания модернизированная система питания тракторного дизеля, условная схема которой показана на рисунке 89 (а. с. СССР № 1731973). Система питания содержит смеситель, установленный в П-образном канале головки ТНВД. Это позволяет сократить время между приготовлением МТЭ и ее использованием. Вращение вала смесителя с установленными на нем лопастями попарно с левой и правой навивкой улучшает однородность МТЭ. Система позволяет приготовить МТЭ в диапазоне изменения концентрации метанола 0...100 % и ДТ — 100...0 % в количестве, необходимом для работы дизеля на любом требуемом режиме. Погрешность дозирования компонентов МТЭ не превышает 5 % во всех случаях.

Влияние МТЭ на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 в зависимости от нагрузки при частоте вращения $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, показано на рисунке 90, а.

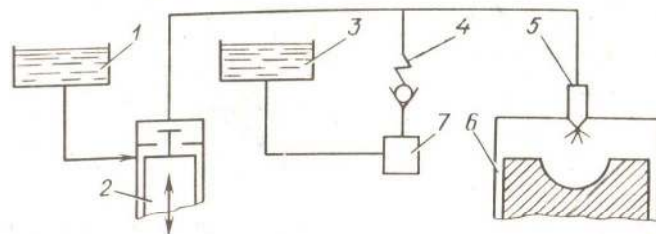


Рис. 88. Схема подачи метанола с использованием волнового процесса: 1 — бак для метанола; 2 — секция ТНВД; 3 — бак для ДТ; 4 — обратный клапан; 5 — форсунка; 6 — цилиндр; 7 — регулятор давления

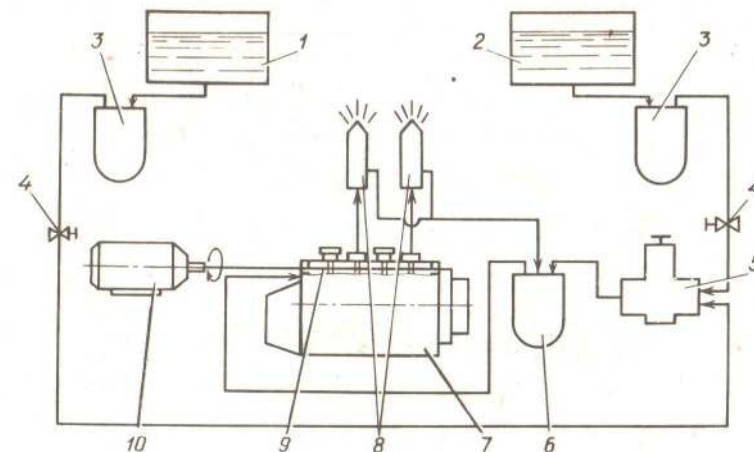


Рис. 89. Система для приготовления и подачи МТЭ: 1 — бак для ДТ; 2 — бак для метанола; 3 — фильтры грубой очистки; 4 — регулирующие устройства; 5 — топливopодкачивающий насос; 6 — фильтр тонкой очистки; 7 — ТНВД; 8 — форсунки; 9 — смеситель; 10 — электродвигатель

Как видно из графиков, при работе дизеля на МТЭ содержание NO_x в ОГ снижается в два раза. Так, на номинальном режиме при $p_e = 0,6 \text{ МПа}$ концентрация NO_x в ОГ для дизельного процесса составила 0,036 %, а при работе дизеля на МТЭ с содержанием 30 % метанола — 0,017 %, причем с ростом нагрузки эта тенденция увеличивается.

Содержание сажи в ОГ дизеля также снижается при работе на МТЭ. Так увеличение нагрузки от $p_e = 0,24 \text{ МПа}$ до $p_e = 0,72 \text{ МПа}$ приводит к росту выброса сажи от 2,3 до 7,3 ед. по шкале Боша. При работе на МТЭ выброс сажи уменьшается во всем диапазоне нагрузок. Снижение содержания сажи в ОГ при работе дизеля на МТЭ связано с особенностью горения спиртов в условиях недостатка кислорода воздуха. Так, уменьшение выбросов сажи в ОГ составляет соответственно 17, 37 и 48 % для случаев работы дизеля с содержанием метанола 10, 20 и 30 %.

Уровень содержания CO в ОГ дизеля практически не отличается от его значений при работе на ДТ или МТЭ. Концентрация CO_2 в ОГ дизеля Д-21А1 при работе на МТЭ меняется неоднократно. Так, при увеличении p_e от 0,24 до 0,72 МПа содержание CO_2 увеличивается с 3,77 до 9,13 % для дизельного процесса и с 4,31 до 9,81 % при работе на МТЭ с 30 % метанола.

Содержание CH_x в ОГ дизеля несколько возрастает при работе на МТЭ. Решающее значение в этом случае оказывает ускорение процесса горения, снижение осредненной температуры цикла и, как следствие, температуры ОГ. На номинальном скоростном ре-

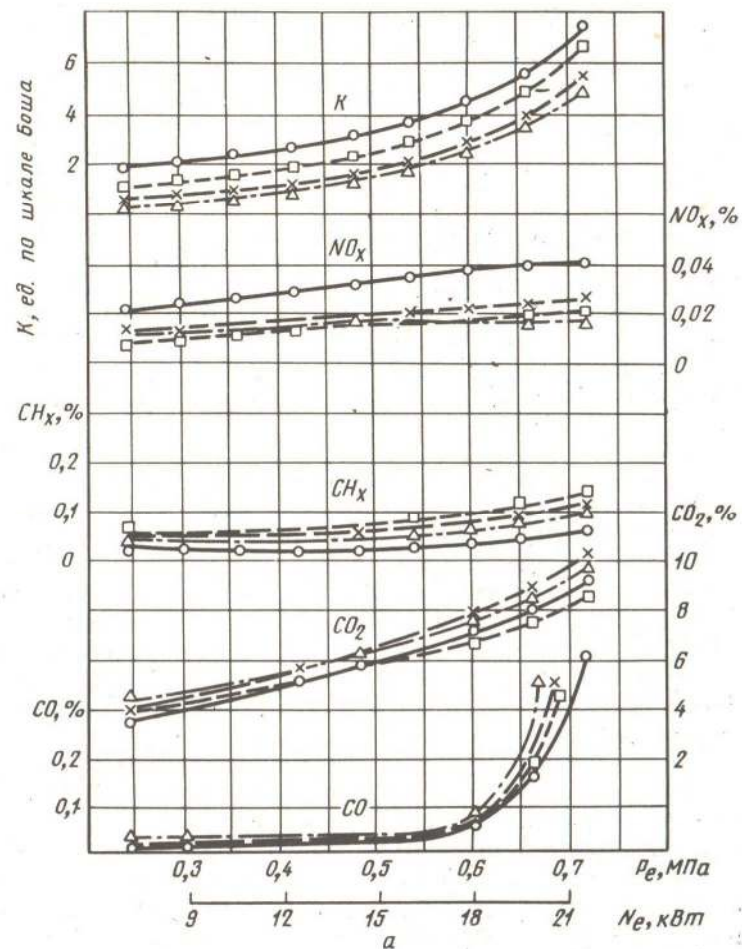


Рис. 90. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при работе на МТЭ в зависимости:

а — от нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б — частоты вращения коленчатого вала; о — дизельный процесс; □ — 10 % метанола в МТЭ; × — 20 % метанола в МТЭ; Δ — 30 % метанола в МТЭ; в — количества метанола в МТЭ при $p_e = 0,6 \text{ МПа}$: о — $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; × — $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$; Δ — $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

жиме при $p_e = 0,6 \text{ МПа}$ концентрация CH_x увеличивается от 0,05 % для дизельного процесса до 0,1 % при работе на МТЭ с 30 % метанола.

На рисунке 90, б показано содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 при работе на МТЭ в зависимости от частоты вращения коленчатого вала.

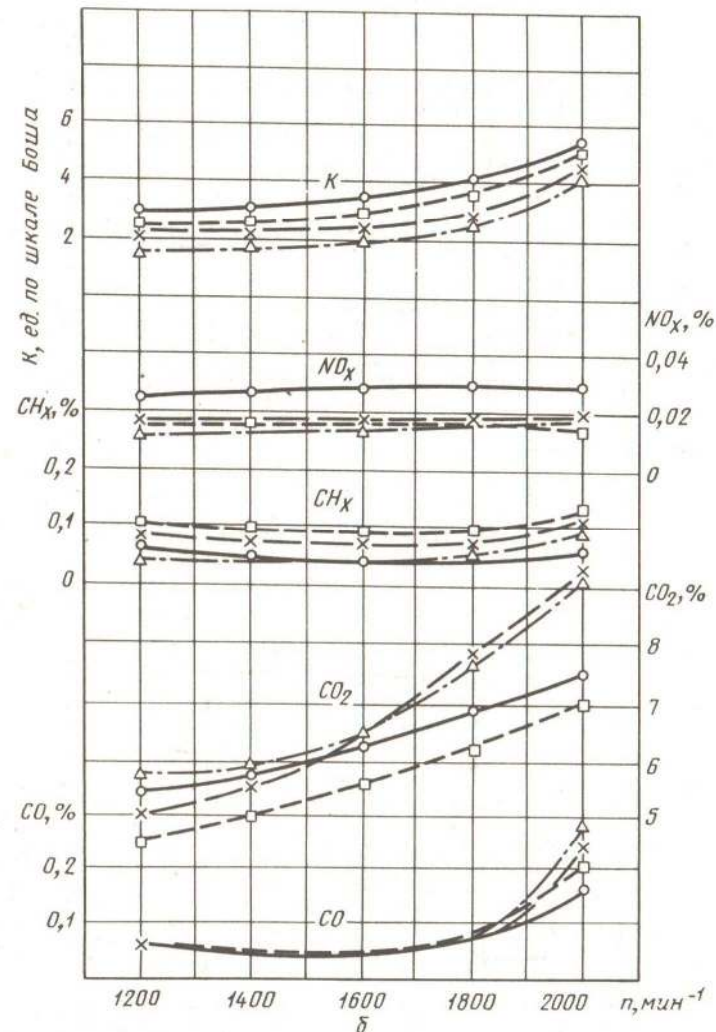


Рис. 90 (продолжение)

Анализ графиков показывает, что содержание всех токсичных компонентов в ОГ возрастает при увеличении частоты вращения. Так, содержание NO_x увеличивается с 0,025 % при 1200 мин^{-1} до 0,031 % при 2000 мин^{-1} при работе дизеля на ДТ, и с 0,012 % при 1200 мин^{-1} до 0,016 % при 2000 мин^{-1} при работе дизеля на МТЭ с 30 % метанола. Содержание сажи при работе на МТЭ

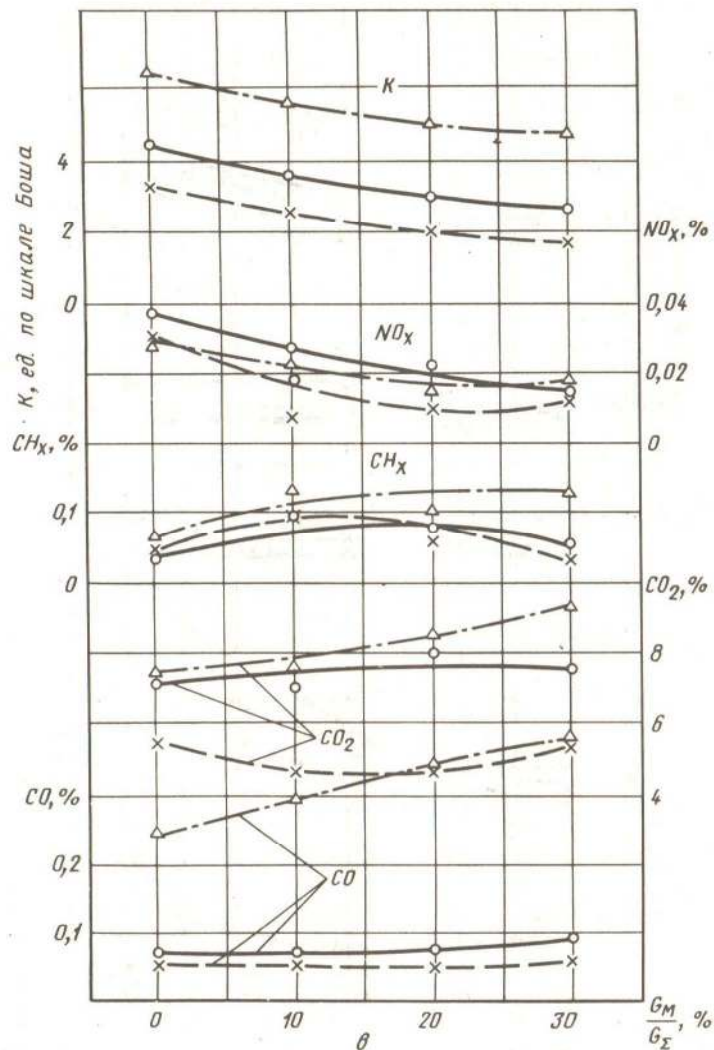


Рис. 90 (продолжение)

также уменьшается. При $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ снижение содержания сажи составляет 49 %, а при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ — лишь 28 %.

Содержание других токсичных компонентов остается на уровне дизельного процесса или увеличивается незначительно.

На рисунке 90, в представлены графики содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля Д-21А1 в зависимости от количества метанола в МТЭ при $p_e = 0,6 \text{ МПа}$ и различных частотах враще-

ния. Анализ графиков показывает, что применение МТЭ позволяет снизить содержание сажи в ОГ на 27...54 % при 1400 мин^{-1} , на 16...48 % при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и на 11...26 % при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Содержание NO_x в ОГ дизеля также уменьшается на 65...75 % при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, на 26...52 % при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и на 19...44 % при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Эмиссия CO в ОГ дизеля при его работе на МТЭ несколько увеличивается лишь при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, в остальных же случаях содержание CO остается на уровне дизельного процесса. Содержание CO_2 и CH_x в ОГ дизеля при работе на МТЭ изменяется неоднозначно.

Основные направления исследований по применению метанола в качестве топлива для дизелей в России. 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 проведении 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 91.

Стендовые исследования необходимо проводить 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 различных способов требует и разной сложности конструктивных изменений в дизеле 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

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 в качестве топлива для дизелей за рубежом. В Калифорнии (США) на различных уровнях прорабатываются варианты решения топливной проблемы, и в том числе применение в дизелях метанола. Этот вариант, как считают эксперты, имеет большие потенциальные возможности. Замена ДТ на метанол позволила бы устранить все более обостряющуюся проблему выброса твердых частиц в атмосферу. Полный перевод транспорта на метанол привел бы, как считается, к частичному восстановлению характеристик слоя озона в атмосфере, оцениваемому в 40...80 % от этого 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», «Катерпиллер», «Дженерал Моторс» (США), «Коматсу» (Япония), «Бурмайстер и Вайн» (Дания), «Сааб Скания», «Вольво» (Швеция), «Фольксваген», «Даймлер-Бенц», МВМ, КГД, МАН (Германия) и др., а также исследовательские центры: Миссурий-

ский университет, Юго-Западный исследовательский институт, Иллинойский университет (США), Технологический институт г. Ахена (Германия), Институт механики Триестского университета (Италия), Йоганнесбургский 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 % ДТ. 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 имелась экономия до 4,4 % при работе дизеля с метанолом, которым замещалось от 8 до 44 % ДТ.

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 % ДТ. 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 неразделенной КС 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 % гекса-

нола; 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 частичек сажи значительно меньше. Вместе с тем содержание NO_x в ОГ несколько выше. Исследователи объясняют увеличение содержания 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 газойля с метанолом. В качестве присадки, улучшающей самовоспламенение заряда, использовался изопропилнитрит. Исследования проводились на одноцилиндровом дизеле с предкамерным смесеобразованием. Верхний предел работы дизеля на газойльметанольной смеси ограничивается содержанием 35 % метанола. Дальнейшие исследования проводились на серийных дизелях 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 в.м.т.

Исследования показали, что удельный расход топлива 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 CO 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 «Катерпиллер» 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 распыляющих отверстий форсунки. Очаг воспламенения от свечи накаливания на любой нагрузке быстро

распространяется на весь объем КС. Эта особенность процесса сгорания способствует снижению выброса с ОГ 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 CH_x в ОГ при существенном снижении 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 принудительном воспламенении при степени сжатия 11,5. В процессе модернизации были заменены поршни, вместо системы впрыскивания ДТ установлены бесконтактная система зажигания, генератор паров метанола, газовый карбюратор-смеситель, система регулирования. Выбросы NO_x и 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 NO_x на 50 % меньше, чем при работе с ДТ. Отработавшие газы практически не содержат сажи, и применение КН окислительного типа позволяет снизить выбросы CO до нуля, а CH_x — на 95 %. Недостаток — высокая стоимость метанола с присадками.

Данные по износу деталей, 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 приводятся и в других аналогичных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л.: Недра, 1977.
2. Малов Р. В. Токсичность многокомпонентных газовых смесей//Гигиена и санитария. — 1978. — № 5.
3. Кустов В. В., Тиунов А. А., Васильев Г. А. Комбинированное действие промышленных ядов. — М.: Медицина, 1975.
4. Тиунов Л. А., Кустов В. В. Токсикология окиси углерода. — М.: Медицина, 1980.
5. Смайлис В. И. Малотоксичные дизели. — Л.: Машиностроение, 1972.
6. Кузнецов И. Е., Троицкая Т. М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. — М.: Химия, 1979.
7. Фельдман Ю. Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. — М.: Медицина, 1975.
8. Никитин Д. П., Новиков Ю. В., Зарубин Г. П. Научно-технический прогресс, природа и человек. — М.: Наука, 1977.
9. Шабад Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. — М.: Медицина, 1973.
10. Ахмеджанов М. А., Султанов А. С. Состав и температура воздуха в кабине трактора//Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. — 1975. — № 12.
11. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. — М.: Мир, 1980.
12. Вредные вещества в промышленности /Справочник для химиков, инженеров и врачей. — Т. 2/Под ред. Н. В. Лазарева. — М.: Химия, 1976.
13. Гигиеническая оценка акролеина как загрязнителя атмосферного воздуха// Гигиена и санитария. — 1970. — № 3.
14. О канцерогенных свойствах выхлопной сажи автотранспорта/Б. П. Гуринов, В. Н. Тугаринова, О. И. Васильева и др.//Гигиена и санитария. — 1962. — № 12.
15. Мачульский Ф. Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи: Токсичность двигателей внутреннего сгорания и некоторые пути ее уменьшения. — М.: Наука, 1966.
16. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1973.
17. Павлович Л. М. Камеры сгорания высокоэкономичных и малотоксичных дизелей. — М.: ЦНИИТЭИПтяжмаш, 1981.
18. Мочешников Н. А., Френкель А. И. Обобщенные зависимости влияния регулировок дизеля на его токсичность и экономические показатели//Автомобильная промышленность. — 1974. — № 11.
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.
20. Сахаров А. Г. Дизельная и топливная аппаратура тракторов. — М.: Колос, 1977.
21. Сахаров А. Г. Начальная фаза окисления углеводородов при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП, 1965, вып. 2.
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.
23. Сахаров А. Г. Ионизационные токи при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП. — 1966. — Т.3 — Вып.2.
24. Багиров Д. Д., Златопольский А. В. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1974.
25. Сахаров А. Г. Исследование вихрекамерного дизеля СМД-14 на эксплу-

атационную надежность при дизельном и бензодизельном процессах. — М.: МИИСП. — 1965. — Т.2. — Вып.2.

26. Лебедев О. Н. Методы улучшения смесеобразования в судовых четырехтактных дизелях. — Новосибирск: Наука, 1973.
27. Лерман Е. Ю., Гладков О. А. Высококонцентрированные водотопливные эмульсии — эффективное средство улучшения экологических показателей легких быстроходных дизелей//Двигателестроение. — 1986. — № 10.
28. Опыт снижения токсичности отработавших газов дизелей за счет подачи воды/А. К. Болотов, В. А. Лиханов, В. М. Попов, А. М. Сайкин//Двигателестроение. — 1982. — № 7.
29. Симатов А. И. Каталитические нейтрализаторы Димитровградского завода//Автомобильная промышленность. — 1985. — № 12.
30. Жегалин О. П. и др. Определение суммарного содержания альдегидов в отработавших газах автотракторных двигателей//ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш. — 1976.
31. Влияние типа рабочего процесса и режимов работы быстроходных дизелей на свойства сажи и отработавшие газы/М. М. Вихерт, А. П. Кратко, И. С. Рафельес и др.//Автомобильная промышленность. — 1975. — № 10.
32. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. — Л.: Колос, 1980.
33. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. — М.: Высшая школа, 1978.
34. Методы планирования многофакторных экспериментов в дизелестроении/М. Н. Овсянников, В. А. Петухов, М. Ф. Усень, И. Л. Шагалов//Двигателестроение. — 1979. — № 9.
35. Гиршович В. Е., Френкель А. И. Опыт применения математической теории планирования эксперимента при снятии токсических характеристик дизелей//Тракторы и сельхозмашины. — 1977. — № 3.
36. Звонов В. А., Фурса В. В. Применение метода математического планирования эксперимента для оценки токсичности двигателя//Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков: Высшая школа, 1973, вып. 17.
37. Рафадес-Ламарка Э. Э., Звонов В. А., Фурса В. В. Математическое планирование экспериментального исследования двигателей внутреннего сгорания//Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков: Высшая школа, 1972, вып. 16.
38. Мержиевский В. В. Влияние управления фазами топливоподачи на токсические показатели дизеля Д-37Е//Двигателестроение. — 1979. — № 12.
39. Чемлева Т. А., Микешина Н. Г. Применение симплекс-решетчатого планирования при исследовании диаграмм состав — свойство//Новые идеи в планировании эксперимента. — М., 1969.
40. Пен Р. З., Менчер Э. М. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве. — М.: Лесная промышленность, 1973.
41. Лиханов В. А., Попов В. М. Применение планирования эксперимента для исследования подачи метанола на впуске дизеля//Двигателестроение. — 1986. — № 7.
42. Коллеров Л. К. Газовые двигатели поршневого типа. — Л.: Машиностроение, 1968.
43. Генкин К. И. Газовые двигатели. — М.: Машиностроение, 1977.
44. Самоль Г. И., Гольдблат И. И. Газобаллонные автомобили. — М.: Машгиз, 1963.
45. Природный газ как моторное топливо на транспорте /Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Грищенко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский. — М.: Недра, 1986.
46. Скотт У. М. Новые виды топлива для автомобильных дизелей//Перспективные автомобильные топлива /Пер. с англ. — М.: Наука, 1982.
47. Смалъ Ф. В., Арсенов Е. Е. Перспективные топлива для автомобилей. — М.: Транспорт, 1979.
48. Обельницкий А. М. Топливо и смазочные материалы. — М.: Высшая школа, 1982.
49. Абрамов С. А., Гладких В. А., Попов В. П. О работах в ФРГ по применению метанола в качестве моторного топлива//Двигателестроение. — 1983. — № 8.

50. Хачиян А. С. Применение спиртов в дизелях//Двигателестроение. — 1984. — № 8.
51. Лиханов В. А., Попов В. М. Опыт подачи метанола на впуске дизеля//Двигателестроение. — 1986. — № 4.
52. Совершенствование показателей дизелей изотермического подвижного состава /Ю. П. Алейников, Е. И. Боксенок, Р. В. Малов, С. В. Никонин//Двигателестроение. — 1984. — № 7.
53. Лиханов В. А., Попов В. М. Работа дизеля на метаноле с двойной системой топливоподачи // М.: Двигателестроение. — 1986. — № 8.
54. Vollmer H., Holtei H. Abgasuntersuhungen an Dieselmotoren aus dem Untertagebetrieb//Motortechn. Leitschrift. — 1980. — Bd. 41. — H. 1.
55. Brickleyer B. A., Spindt R. S. Measurement of polynuclear aromatic hydrocarbons in diesel exhaust gases// SAE Techn. Paper Ser. — 1978. — Vol. 115. — N 780.
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.
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.
58. Daßler H. Möglichkeiten zur Minderung von Imissions schaben 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. Harby H. L. et al. Lead as environmental poison//Clin. pharmacol. ther. — 1971. — N 6.
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 Tehn. Paper Ser. — 1980. — N 800969.
63. Pollution formation and destruction in flames. Vol. 1. Progress in Energy and Combastions Scinse/Edited by N. A. Ghigier, Univ. of Sheffield (England). — Oxford: Pergamon Press Ltd, 1976.
64. Ysraël G. et al. Untersuchungen über die Partikelund PAH — Emission von Fahrzeug Dieselmotoren//MTZ. — 1982. — Bd. 43. — H. 12.
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.
66. Bericht über den II Internationalen Kongress über Verbrennungskraft — maschinen in Barcelona Spanien, Teil 2//MTZ. — 1975. — Bd. 36. — H. 11.
67. Wilson R. P., Muir E. B., Pellicciotti 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).
69. Elsbett K., Elsbett L., Elsbett G., Behrens M. The Duotkermic Combustion for D.Y.Diesel Engine. SAE Techn. Paper Ser. — 1986. — N 860310.
70. Ford H. S., Merriion 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.
71. Elk's conversion of a 6 uglinder 11,6 1 turbocharged intercooled truck engine for experimental purpose/M. Behrens, L. Elsbett, G. Elsbett, K. Elsbett//SAE Techn. Paper Ser. — 1985. N 850551.
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.
73. Neitz A., Chmela F. Eignung von M.A.N. — FM — Dieselmotoren für den Betrib min rienen Alkoholkraftstoffen// MTZ. — 1981. — Bd. 42. — H. 12.
74. Extended performance of alcoholfumigation in diesel engines throung different multipoint alcohol injection timing cycles/ D. Savagel, R. A. White, S. Cole, G. Pritscheff//SAE Techn. Paper Ser. — 1986. — N 861580.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 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	18
3. НОРМИРОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ	22
3.1. Оценка загрязненности атмосферы отработавшими газами	22
3.2. Государственные и отраслевые нормы и стандарты	30
4. ОБРАЗОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ	33
5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОКСИЧНОСТЬ И ДЫМНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ	46
5.1. Эксплуатационные и конструкционные факторы	46
5.2. Параметры и регулировки топливной аппаратуры	57
5.3. Топливо и масла	66
6. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ	72
6.1. Малотоксичные рабочие процессы	72
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
10.1. Применение сжатого природного газа	172
10.2. Применение метанола	188
ЛИТЕРАТУРА	220

CONTENTS

PREFACE	4
1. PROSPECTS OF AUTO-TRACTOR DIESEL ENGINE PRODUCTION	6
2. ESTIMATION OF EXHAUST TOXICITY	8
2.1. Exhaust sources	8
2.2. Composition of exhaust gases	9
2.3. Main components of exhaust gases and their toxicity	18
3. RATE SETTING OF TOXICITY	22
3.1. Assessment of atmospheric pollution by exhaust gases	22
3.2. National and industries' norms and standards	30
4. FORMATION OF TOXIC COMPONENTS	33
5. IMPACT OF VARIOUS FACTORS ON TOXICITY AND SMOKE INTENSITY	46
5.1. Operational and design factors	46
5.2. Parameters and adjustment of fuel equipment	57
5.3. Fuels and oils	66
6. DECREASING OF TOXICITY AND SMOKE INTENSITY	72
6.1. Low-toxic working process	72
6.2. Fuel feeding for inlet	85
6.3. Water feeding into cylinders	93
7. CLASSIFICATION OF SYSTEMS FOR DECREASING TOXICITY AND SMOKE INTENSITY. MAJOR REQUIREMENT TO THEM	107
7.1. Theoretical base	107
7.2. Classification of systems for decreasing diesel toxicity	112
7.3. Major requirements for toxicity decrease systems	116
8. DESIGN FEATURES AND PRINCIPAL PARAMETERS OF TOXICITY DECREASE SYSTEMS	117
9. TOXICITY AND SMOKE TEST OF DIESEL ENGINES	143
9.1. Methods and instruments for gas analysis	143
9.2. Application of experiment design theory	151
10. USE OF ALTERNATIVE FUELS FOR DECREASING TOXICITY OF AUTO-TRACTOR DIESEL ENGINES	171
10.1. Use of compressed natural gas	172
10.2. Use of methanol	188
LITERATURE	220