

**В. А. ЛИХАНОВ**

**ПРИРОДНЫЙ ГАЗ  
КАК МОТОРНОЕ ТОПЛИВО  
ДЛЯ ТРАКТОРНЫХ  
ДИЗЕЛЕЙ**

**Киров 2002**

**В. А. ЛИХАНОВ**

**ПРИРОДНЫЙ ГАЗ  
КАК МОТОРНОЕ ТОПЛИВО  
ДЛЯ ТРАКТОРНЫХ  
ДИЗЕЛЕЙ**

**Киров 2002**

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор **В.Н.Ложкин**  
доктор технических наук, профессор **М.Р.Петриченко**

**Лиханов В.А.** Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей. - Киров, Вятская ГСХА. 2002. - 280 с.

Монография академика Российской Академии транспорта доктора технических наук, профессора **Лиханова В.А.** посвящена вопросам применения природного газа в качестве альтернативного моторного топлива, снижению токсичности и дымности отработавших газов тракторных дизелей малой размерности.

Рассмотрены перспективы и основные направления научных исследований по применению природного газа в дизелях. Предложены и исследованы способы подачи природного газа в дизели с целью улучшения их эксплуатационных показателей, в первую очередь снижения токсичности и дымности отработавших газов, замены традиционного нефтяного топлива. Рассмотрены вопросы, касающиеся изменения конструкций систем питания, особенностей эксплуатации топливной аппаратуры и регулирования топливоподачи при работе дизелей на природном газе. Особое внимание уделено исследованиям работы тракторных дизелей на природном газе, его влиянию на процесс сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели, токсичность и дымность отработавших газов, рассмотрены конструкции тракторов и самоходных погрузчиков российского и зарубежного производств с системами питания, модернизированными для работы на сжатом природном газе.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников и аспирантов, занимающихся исследованиями в области применения альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания.

Таблиц - 14. Иллюстраций - 97. Библиография - 374 названия.

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1.  $n$  - частота вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$
2.  $p_e$  - среднее эффективное давление, МПа
3.  $N_e$  - эффективная мощность дизеля, кВт
4.  $M_k$  - крутящий момент дизеля, Н·м
5.  $G_b$  - часовой расход воздуха, кг/ч
6.  $\eta_v$  - коэффициент наполнения
7.  $G_T$  - часовой расход топлива, кг/ч
8.  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха
9.  $g_e$  - удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч
10.  $\eta_e$  - эффективный коэффициент полезного действия
11.  $t_r$  - температура отработавших газов, °С
12.  $\varphi$  - угол поворота коленчатого вала, градус
13.  $\Theta_{\text{впр}}$  - установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус
14.  $\tau_i$  - период задержки воспламенения
15.  $p_z$  - максимальное давление сгорания в цилиндре, МПа
16.  $p_c$  - давление конца сжатия, МПа
17.  $\frac{dp}{d\varphi}$  - скорость нарастания давления в цилиндре, МПа/градус
18.  $\chi$  - относительное тепловыделение от сгорания топлива
19.  $\chi_i$  - активное тепловыделение
20.  $\frac{d\chi}{d\varphi}$  - относительная скорость активного тепловыделения, 1/градус
21.  $T$  - осредненная температура цикла в цилиндре, К
22.  $G_{\text{тд}}, G_T, G_{\text{зап}}$  - часовые расходы дизельного топлива, запального дизельного топлива кг/ч
23.  $G_r$  - часовой расход природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$
24.  $\text{NO}_x$  - оксиды азота, мг/л, ррт, %
25.  $\text{CO}$  - оксид углерода, мг/л, ррт, %
26.  $\text{CO}_2$  - диоксид углерода, мг/л, ррт, %
27.  $\text{C}_n\text{H}_m$  - суммарные углеводороды, мг/л, ррт, %
28.  $\text{C}, \text{K}$  - сажа, ед. по шкале Боша

29. ДТ - дизельное топливо
30. ОГ - отработавшие газы
31. ЦЧ - цетановое число
32. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
33. КС - камера сгорания
34. КПД, к.п.д. - коэффициент полезного действия
35. в.м.т. - верхняя мертвая точка
36. н.м.т. - нижняя мертвая точка
37. КН - каталитический нейтрализатор
38. ОКР - опытно-конструкторская работа
39. НИР - научно-исследовательская работа
40. ПАУ - полициклические ароматические углеводороды
41. ПДК - предельно допустимая концентрация
42. СПГ - сжатый природный газ
43. СНГ - содружество независимых государств
44. ТА - топливная аппаратура
45. ТНВД - топливный насос высокого давления

## ВВЕДЕНИЕ

Двигатели тракторов и автомобилей, представляющие основу мобильного обеспечения сельскохозяйственного производства Российской Федерации и стран СНГ, являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды и потребителями моторных нефтяных топлив. Так, автотранспорт в странах СНГ потребляет в год около 60 млн. тонн топлива, только в сельском хозяйстве этих стран находится около 3 млн. тракторов и более миллиона комбайнов. При этом необходимо иметь в виду, что все тракторные и комбайновые двигатели - дизели.

В связи с тем, что дизели, кроме определенного экологического преимущества (меньшая эквивалентная токсичность в 1,5...2 раза по сравнению с карбюраторными двигателями), имеют высокую топливную экономичность (на 25...30%), этот тип ДВС необходимо рассматривать как наиболее перспективный практически во всех отраслях хозяйства.

По ориентировочной оценке специалистов суммарная масса выбросов всех дизелей, находящихся в странах СНГ, составляет 14...18 млн. тонн в год. Причиняемый ими суммарный экологический ущерб для окружающей среды оценивался в 3...4 млрд. руб. в год в ценах 1984 года.

В ОГ дизелей содержится несколько сотен различных компонентов, многие из которых токсичны. Они попадают на растения, почву, вдыхаются животными и людьми, снижают урожайность, ухудшают качество сельскохозяйственной продукции, оказываются в организмах животных и людей, в потребляемой ими пище.

Анализ состояния проблемы антропогенного и техногенного воздействия транспортных средств на окружающую среду позволяет сделать вывод, что при существующих тенденциях в развитии транспортного комплекса России (технического уровня тракторов и автомобилей, качества топлив и масел, состоянию работ

по контролю и уменьшению вредных выбросов) его негативное воздействие на окружающую среду через 5...10 лет значительно усилится.

Как и за рубежом, основными направлениями по снижению загрязнения атмосферного воздуха от вредных выбросов тракторов и автомобилей в сельском хозяйстве России будут улучшение качества ДВС и их социально-экологических характеристик, снижение расхода топлива, ускоренное развитие транспортных средств, работающих на альтернативных моторных топливах нефтяного происхождения и имеющих улучшенные эксплуатационные показатели.

Крайне неблагоприятная экологическая обстановка во многих регионах, международные обязательства России по охране окружающей среды определяют важность работ, направленных на ее оздоровление, в первую очередь на снижение загрязнения атмосферного воздуха от вредного выброса транспортных средств.

Отмечено, что на долю ДВС приходится более 50% глобального и до 80...90% регионального загрязнения воздуха, причем доля выбросов в локальных участках может значительно превышать средние значения по городу, региону, что приводит к созданию там экологически экстремальных условий.

Вместе с тем весьма актуальным для хозяйства России является проблема экономии нефтяного моторного топлива, исследование возможности его замены на альтернативные виды топлива нефтяного происхождения и использование их в двигателях транспортных средств.

При этом особый интерес представляют задачи одновременного улучшения экологических и эффективных показателей дизелей транспортных средств.

В связи с такой постановкой проблемы Указом Президента Российской Федерации от 13 июня 1996 года № 884 «О доктрине развития российской науки» и постановлением Правительства Российской Федерации от 17 апреля 1995 года № 360 «О государственной поддержке развития науки и научно-технических разработок», решением Правительственной комиссии по научно-технической политике (протокол заседания от 28 мая 1996 года № 2, ВК-П27-П8-36пр) разработка транспортных средств на аль-

тернативных видах топлива включена в перечень критических технологий федерального уровня. Это говорит о практической значимости технологии, ее влиянии на развитие общественного производства. Кроме того, во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 1995 года № 472 «Об основных направлениях энергетической политики и структурной перестройки топливно-энергетического комплекса Российской Федерации на период до 2010 года» и Закона РСФСР от 19 декабря 1991 года 2060-1 «Об охране окружающей природной среды» Правительством Российской Федерации за последние годы принят ряд постановлений, направленных на улучшение использования альтернативных видов топлива в двигателях:

- от 15 января 1993 года № 31 «О неотложных мерах по расширению замещения моторных топлив газом»;
- от 15 апреля 1994 года № 325 «О создании Комиссии по использованию природного и сжиженного нефтяного газа в качестве моторного топлива»;
- от 6 марта 1996 года № 263 «О федеральной целевой программе «Топливо и энергия» на 1996-2000 годы».

Анализ передовых направлений научных исследований, проведенных за рубежом и в странах СНГ, посвященных данной проблеме, позволяет сделать вывод, что для практической реализации в двигателях транспортных средств, и в первую очередь в дизелях, возможно использование таких альтернативных топлив, как природный газ и метиловый спирт (метанол), которые имеют нефтяное происхождение и могут существенно улучшить эксплуатационные показатели дизелей и при этом расширить ресурсы моторного топлива.

В ряде институтов бывшего СССР в разные годы велись работы по использованию в дизелях альтернативных топлив нефтяного происхождения, в первую очередь природного газа. Результаты теоретических работ и экспериментальных исследований отражены в работах Аксенова Д.Т., Васильева Ю.Н., Вырубова Д.Н., Генкина К.И., Гуревича Н.А., Гольдבלата И.И., Долганова К.Е., Кайдалова А.А., Кеймаха Я.И., Ксенофонтова С.И., Коллерова Л.К., Кудряша А.П., Лебедева С.Е., Мазинга Е.К., Мансфельда Г.Г., Мараховского В.П., Мурашова О.Д., Мутали-

бова А.А., Основенко Н.Е., Пятниченко А.И., Равкинда А.А., Самоля Г.И., Струнге Б.Н., Субоча Н.И., Чудакова Е.А. и других.

Углубленный анализ результатов научных исследований показывает, что зарубежными учеными и отечественными исследователями разработаны предпосылки, проведены глубокие экспериментальные работы на базе высококачественной измерительной техники по экологическим исследованиям дизелей. Имеются некоторые работы по исследованию возможности совместного использования в дизелях природного газа и метанола.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследования по применению альтернативных топлив проводились без должного учета взаимосвязи экологических и эффективных показателей дизелей, практически нет работ по применению альтернативных топлив в тракторных дизелях малой размерности, отсутствуют работы по созданию систем регулирования подачи газа для дизелей с насосами распределительного типа и семейства унифицированных смесителей-дозаторов и т.д. Мало работ, заканчивающихся созданием макетных образцов и проведением функциональных испытаний.

Все это дает основание предполагать, что улучшение эксплуатационных показателей дизелей тракторов, предназначенных для эксплуатации в экологически экстремальных условиях, путем снижения токсичности и дымности ОГ, экономии нефтяного моторного топлива за счет применения альтернативных топлив, является весьма актуальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение и включенной в перечень критических технологий федерального уровня.

## 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Социально-экологические аспекты влияния автотракторных двигателей на окружающую среду

Ежегодно в атмосферу Земли поступает большое количество токсичных веществ, в том числе 700 млн. тонн оксида углерода, 150 млн. тонн оксидов азота, 200 млн. тонн твердых частиц, 200 млн. тонн диоксида серы. Значительная часть этих веществ выбрасывается автотранспортом [1...4].

В Мюнхене в ноябре 1978 г. была подписана международная конвенция о трансграничном загрязнении воздуха. Там же принят Протокол по сокращению выброса и трансграничного переноса соединений серы к 1993 г. по сравнению с 1980 г. на 30%. Существовавший тогда СССР, в соответствии с Протоколом, должен был сократить выбросы диоксида серы (сернистого газа) на 30% к 1993 г., Франция, Финляндия, ФРГ - на 50% и более к 1990 г., Канада - на 65% к 1994 г., Швеция - на 65% к 1995 г. Подписанный в 1988 г., Софийский Протокол предусматривает стабилизацию выброса оксидов азота [5].

В последнее время стандарты на выбросы вредных веществ с ОГ автотранспорта постоянно ужесточаются. Самые строгие нормативы на содержание оксидов азота и углеводородов в ОГ бензиновых ДВС, оксидов азота и твердых частиц в ОГ дизелей уже приняты в Японии, США (особенно в штате Калифорния), Швейцарии и других странах [6]. В 1992...1994 гг. многократное ужесточение норм выброса вредных веществ продолжалось в странах Северной Америки, Японии, большинстве стран Европы, в наиболее развитых странах Юго-Восточной Азии [5].

В середине 70-х годов ежегодный ущерб от загрязнения окружающей среды оценивался в Великобритании в 0,8 млрд. долл., в Канаде - в 2,5 млрд. долл., во Франции - 3 млрд. долл., в США в 25 млрд. долл., в СССР в 25...30 млрд. руб. Сейчас, наряду с широко признанными отрицательными сторонами загрязнения атмосферы вредными веществами из ОГ, надвигается новая проблема - «парниковый эффект» [5].

США в 1975 г. израсходовали на охрану природы 15 млрд. долл., из них на охрану атмосферного воздуха - 4 млрд. долл. В СССР было, соответственно, израсходовано 1,5 млрд. руб., из них 100 млн. руб. - на охрану атмосферного воздуха. В 1988 г. общие природоохранные расходы США составили 80 млрд. долл., Японии - 1,3 триллиона йен. В 1989 г. эти расходы в СССР составили 3 млрд. руб. В развитых странах природоохранные вложения составляют около 5% валового национального продукта [3, 5, 6].

В результате предпринятых усилий выпущенные в 1985 г. в США автомобили выбрасывали оксидов азота на 75% меньше, чем автомобили выпуска 1968 г. Отказ от использования этилированного бензина позволил дополнительно уменьшить вдвое вредное воздействие ОГ в Японии, США, ФРГ, Бразилии и других странах [5]. Темпы сокращения выбросов вредных веществ с ОГ автотранспорта в странах СНГ заметно ниже, что отражает и долю финансирования в них природоохранных мероприятий. Вместе с тем проблема защиты атмосферы от вредного воздействия ОГ в наших странах стала одной из самых серьезных.

Движение автомобильного транспорта и функционирование промышленных предприятий неминуемо сопровождается загрязнением атмосферы выбросами токсичных газообразных и твердых веществ, транспортным шумом, тепловым, электромагнитным излучением движущихся автомобилей, вибрацией зданий и сооружений. Масштабы загрязнения атмосферного воздуха в СССР и США в 1980...1987 гг. даны в табл. 1.1 [5].

Отработавшие газы ДВС являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. По зарубежным данным общий ущерб от этого загрязнения в развитых странах составляет десятки миллиардов долларов ежегодно. Проблема загрязнения атмосферы приобрела серьезную социальную и политическую окраску. Характер вредных выбросов с отработавшими газами ДВС в СССР в 1987 г. дан в табл. 1.2 [5].

Масштаб вредного воздействия ОГ в настоящее время вызывает во всем мире обоснованное беспокойство. В крупных городах, промышленных центрах автотранспорт является основным источником загрязнения атмосферного воздуха.

Таблица 1.1

Суммарные выбросы вредных веществ предприятиями промышленности и автотранспортом, млн. тонн в год

ВЕЩЕСТВО	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
СССР								
Твердые частицы (ТЧ)	15,8	15,7	16,0	16,4	16,5	16,6	16,2	15,4
Сернистый газ (SO <sub>2</sub> )	19,9	19,5	19,8	20,3	19,7	19,6	18,7	18,6
Оксид углерода (CO)	48,4	47,2	49,5	48,8	46,0	44,2	44,5	44,6
Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )	5,5	5,3	5,8	5,9	5,7	5,7	6,1	6,2
Углеводороды (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )	15,2	15,3	15,4	15,0	14,6	14,8	15,2	14,8
Свинец (без учета выбросов автотранспортом)	0,013	0,012	0,013	0,012	0,010	0,010	0,010	0,009
ИТОГО (без свинца)	104,8	103,0	106,5	106,4	102,5	100,9	100,7	99,6
США								
Твердые частицы	8,5	8,0	7,1	7,1	7,4	7,0	6,8	7,0
Сернистый газ	23,4	22,6	21,4	20,7	21,5	21,1	20,7	20,4
Оксид углерода	77,0	74,4	69,4	71,3	68,7	64,6	61,1	61,4
Оксиды азота	20,4	20,4	19,6	19,0	19,7	19,8	19,3	19,5
Летучие органические соединения	22,3	21,0	19,7	20,4	21,5	20,1	19,3	19,6
Свинец	0,07	0,056	0,055	0,046	0,04	0,04	0,009	0,008
ИТОГО (без свинца)	151,6	146,4	137,2	138,5	138,8	132,6	127,2	127,9

Таблица 1.2

Выбросы вредных веществ автотранспортом в 1987 году

Характеристика	Всего	Оксиды азота	Оксид углерода	Углеводороды
Выброс, млн. т	36,12	1,76	28,59	5,81
Доля автотранспорта в суммарных выбросах, %	37	28	66	24

Автотранспорт в странах СНГ потребляет в год около 60 млн. тонн топлива. За один год расходуется 60 млн. штук шин; на производство автомобилей ежегодно тратится 10 млн. тонн металла, что приводит к дополнительному выбросу вредных веществ промышленными предприятиями (производителями шин и металла). По результатам обобщения данных государственного учета выбросов в атмосферу загрязняющих веществ установлено, что в 190 городах бывшего СССР одним из основных источников загрязнения воздушного бассейна (более 50% выбросов) является автотранспорт [5]. В 1989 г. выбросы вредных веществ автотранспортом в целом по СССР составили 35,5 млн. т (в 1988 г. - 36 млн. т). Несмотря на принимаемые меры, объем этих выбросов снижается по годам незначительно. Более того, доля этих выбросов за 10 лет увеличилась с 35% почти до 38% общего объема, что во многом объясняется целым рядом причин.

В первую очередь, это качественное отставание системы стандартов и отсутствие региональных норм; низкое качество топлив и масел; отставание автомобильной и тракторной промышленности в разработке и внедрении комплекса мероприятий, снижающих выбросы вредных веществ автомобилями и тракторами; несоответствие существующей инфраструктуры эксплуатации автотранспортных средств современным требованиям диагностики, контроля, технического обслуживания и ремонта; отсутствие в законодательстве положений, стимулирующих разработку и внедрение малотоксичных двигателей, средств снижения токсичности ОГ, неэтилированных бензинов и других экологически более чистых видов топлив, масел необходимого качества. Отсутствуют также стимулы повышения культуры эксплуатации автотранспорта [5...7].

В настоящее время в Российской Федерации действует более 30 стандартов по охране природы в той или иной мере действующих на предприятиях автотранспорта, но не более восьми из них регулируют токсичность двигателей [8...17]. Тем не менее, со времени введения первого стандарта в 1970 г., величина суммарного выброса вредных веществ отечественными автомобилями (с учетом токсической значимости компонентов ОГ) снижена более чем в два раза, в том числе по оксиду углерода в четыре раза, углеводородам в 2,5...3 раза [5...7].

За последние 10 лет выбросы вредных веществ выпускаемыми в странах бывшего СССР грузовыми автомобилями, автобусами и сельскохозяйственной техникой в среднем уменьшены в два раза. Это достигнуто посредством совершенствования рабочего процесса дизелей, перевода работы дизелей на газообразное топливо, внедрения новых систем топливоподачи, например, топливных насосов с увеличенным давлением впрыскивания, организации стопроцентного контроля токсичности выпускаемых на заводах автомобилей и других мероприятий. Характер изменения удельных выбросов вредных веществ дизелями, выпускаемыми основными заводами, представлен на рис. 1.1 [5].

Вместе с тем, динамика производства дизелей в западных странах по данным фирмы "Бош" показывает их неуклонный рост (рис. 1.2) [5]. Дизели составляют значительную часть общего числа двигателей транспортных средств и в РФ. Вместе с тем, если данные о вредных выбросах и их воздействиях на окружающую среду автомобильных дизелей широко известны, то особый интерес представляет информация в отношении тракторных и комбайновых дизелей [18...22]. Они составляют значительную долю общего числа двигателей транспортных средств.

Так в настоящее время в РФ и других странах бывшего СССР имеется около 3 млн. тракторов, около одного миллиона зерновых и 500 тыс. прочих комбайнов. Указанный парк распределяется следующим образом: в сельском хозяйстве используются все комбайны и около 70% тракторов. Оставшиеся 30% тракторов, в том числе смонтированным на них специальным строительно-дорожным оборудованием, - в других отраслях народного хозяйства.

При оценке выбросов вредных веществ с ОГ тракторных и комбайновых двигателей необходимо учитывать указанные ниже осо-



бенности. Все отечественные тракторные и комбайновые двигатели - дизели. Бензиновые двигатели используются только в качестве пусковых. Номенклатура машин, снабженных тракторными и комбайновыми двигателями, а также вид и перечень выполняемых ими работ более разнообразны, чем аналогичные показатели автомобильного транспорта. Например, в народном хозяйстве используются более 50 базовых моделей гусеничных и колесных тракторов, на основе которых создано значительное количество модификаций посредством навески дополнительного специального оборудования, что позволяет обеспечить потребности в широком ассортименте дорожных, мелиоративных, горных, подземных, строительных и других машин и оборудования. Принятые по результатам многочисленных исследований удельные и усредненные выбросы тракторных и комбайновых дизелей приведены в табл. 1.3 и 1.4 [5]. Следует отметить, что только в странах СНГ введены с 1980 г. нормы, ограничивающие дымность и вредные выбросы ОГ тракторных и комбайновых двигателей. Внедрение указанных норм позволило снизить суммарные выбросы основных вредных веществ на 15...20% [5...7]. Усилия заводов и НИИ направлены на разработку средств снижения токсичности ДВС, как посредством совершенствования рабочего процесса, перевода ДВС для работы на альтернативных топливах, повышения качества применяемых топлив и смазок, так и созданием систем снижения токсичности и дымности ОГ всей выпускаемой автотракторной техники.

С учетом резкого ужесточения норм на токсичность и дымность ОГ ДВС за рубежом, в Российской Федерации продолжают работы по программе "Высокоскоростной экологически чистый транспорт", проводимые с целью коренного (в 4...8 раз) улучшения социально-экологических показателей перспективной автомобильной техники путем принятия принципиально новых технических решений. Динамика изменения токсичности и дымности ОГ перспективных автомобилей разрабатываемых НАМИ, МАДИ и другими институтами совместно с автомобильными заводами с расчетом организации производства в конкурентоспособных автомобилях приведена в табл. 1.5 [5].

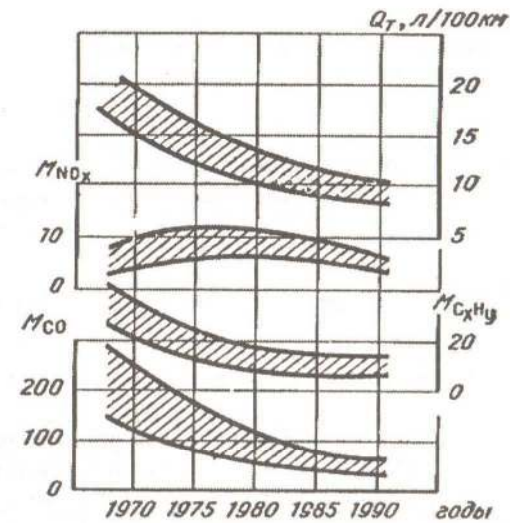


Рис. 1.1. Диапазоны изменения удельных выбросов нормируемых вредных веществ автомобилями и тракторами с дизелями ЯМЗ, КамАЗ, ЗИЛ, ЧТЗ, АМЗ, ММЗ, ВТЗ, ХТЗ и др.: М - удельный выброс вредных веществ, в г/(кВт·ч); ( $C_xH_y$  - углеводороды; NO - оксиды азота; ТЧ - твердые частицы)

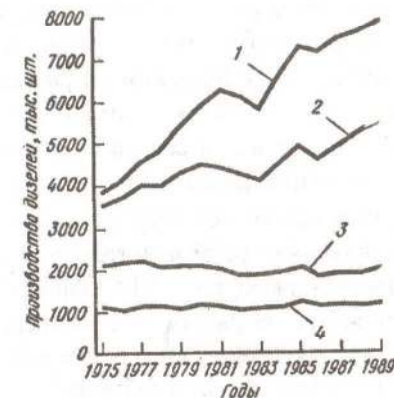


Рис. 1.2. Динамика производства многоцилиндровых дизелей в странах Запада: 1 - легковые автомобили; 2 - грузовые автомобили; 3 - тракторы; 4 - стационарные ДВС

Удельные выбросы вредных веществ с ОГ дизелей на единицу израсходованного топлива

Компонент	Оксиды азота	Оксид углерода	Углеводороды	Оксиды серы	Твердые частицы
Удельный выброс вредных веществ, кг/кг топлива	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$

Усредненные суммарные годовые вредные выбросы дизелями за 1990 год

Вид машины	Выбросы вредных веществ, млн. т				
	Оксиды азота	Оксид углерода	Углеводороды	Оксиды серы	Твердые частицы
Тракторы в сельском хозяйстве	1,50	0,8	0,15	0,10	0,06
Прочие тракторы и машины	1,20	0,64	0,12	0,08	0,03
Комбайны	0,30	0,16	0,03	0,01	0,01
ИТОГО	3,00	1,60	0,30	0,19	0,10

Анализ состояния проблемы загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом у нас и за рубежом позволяет сделать вывод, что при сохранении существующих тенденций в развитии всех составляющих автотранспортного комплекса стран СНГ (технического уровня машин, качества топлив и масел, методов организации перевозок и движения, состояния работ по контролю и уменьшению вредных выбросов), через 5...10 лет антропогенное воздействие автотранспорта на окружающую среду значительно усилится.

За рубежом, в первую очередь в США, Японии и Западной Европе, дальнейшее снижение загрязнения атмосферы автотранспортом будет достигаться посредством повышения качества и социально-экологических характеристик автомобилей и ДВС, снижения расхода топлива автомобилями (по нормам SAFE в США планируется снизить его на 40%), ускоренного развития электромобилей и автомобилей, работающих на альтернативных топливах, изъятия из эксплуатации автомобилей выпуска до 1983 г., регулирования цен

на топливо, разработки и внедрения интеллектуальной транспортной системы [5, 23].

Динамика изменения токсичности и дымности ОГ перспективных автомобилей

Тип ДВС	Вредные выбросы	Изменение объемов вредных выбросов, %			
		1986	1990...1991	1992...1993	1994...1995
ДИЗЕЛИ	Оксиды азота	100	100	80	15
	Оксид углерода	100	30	20	15
	Углеводороды	100	35	26	15
	Твердые частицы	100	30	20	10
	Суммарные	100	42	30	15
	Средства снижения токсичности	-	КНГ*, СФ	КНГ, СФ, РОГ	КНГ, СФ, РОГ, малотоксичный рабочий процесс

\*КНГ - каталитический нейтрализатор-глушитель;  
СФ - сажевый фильтр;  
РОГ - рециркуляция отработавших газов

В нашей стране должны быть первоочередными задачами: разработка и внедрение совершенных (с позиций социальной экологии и расхода топлива) моделей автомобилей и двигателей, систем очистки ОГ, более "экологически чистых" топлив и масел, внедрение электронных систем управления, машин, работающих на альтернативных топливах, электромобилей и т.д. Схема основных направлений и мероприятий по снижению токсичности и дымности ОГ автотранспортных ДВС приведена на рис. 1.3 [5...7, 24...29].

**1.2. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения природного газа**  
**1.2.1. Методы подачи природного газа в дизели**

Еще в 90-х годах прошлого столетия метод воспламенения газа запальным жидким топливом был предложен Сименсом [30, 31]. Рудольф Дизель в 1898 году запатентовал за № 109186 способ воспламенения и сгорания для двигателей. Способ заключался в том, что температура конца сжатия в двигателе подбирается ниже температуры воспламенения газозвдушной смеси, но выше температуры самовоспламенения жидкого топлива. При этом, впрыскивая жидкое топливо и получая его самовоспламенение, осуществляют поджигание газозвдушной смеси, находящейся в цилиндре [31].

Практическое осуществление этой идеи может производиться двумя различными способами. По первому способу цилиндр заполняется воздухом, а газ в сжатом состоянии вводится в конце сжатия и вдувается жидкое топливо. По второму способу газ и воздух поступают одновременно, так, что к началу сжатия цилиндр заполнен газозвдушной смесью, а жидкое топливо подается в конце сжатия обычным способом через форсунку [31].

Интерес к этим способам, возникший еще в конце 30-х годов, был вызван наблюдаемым в ряде стран стремлением заменить дефицитное жидкое топливо газом. В результате серьезных научно-исследовательских работ появились дизели, работающие на газе, и которые по способу их действия делятся на газовые дизели и газожидкостные (газодизельные) двигатели [32...38]. При переводе на газ существующих дизелей преимуществами первого способа является возможность работы совершенно без жидкого топлива и снижение напряжений в деталях двигателя за счет обязательного уменьшения степени сжатия. Однако перевод на газ требует капитальной переделки двигателя, заключающейся в значительном снижении степени сжатия, установке системы зажигания, изменении системы регулирования [32...34, 37...41].

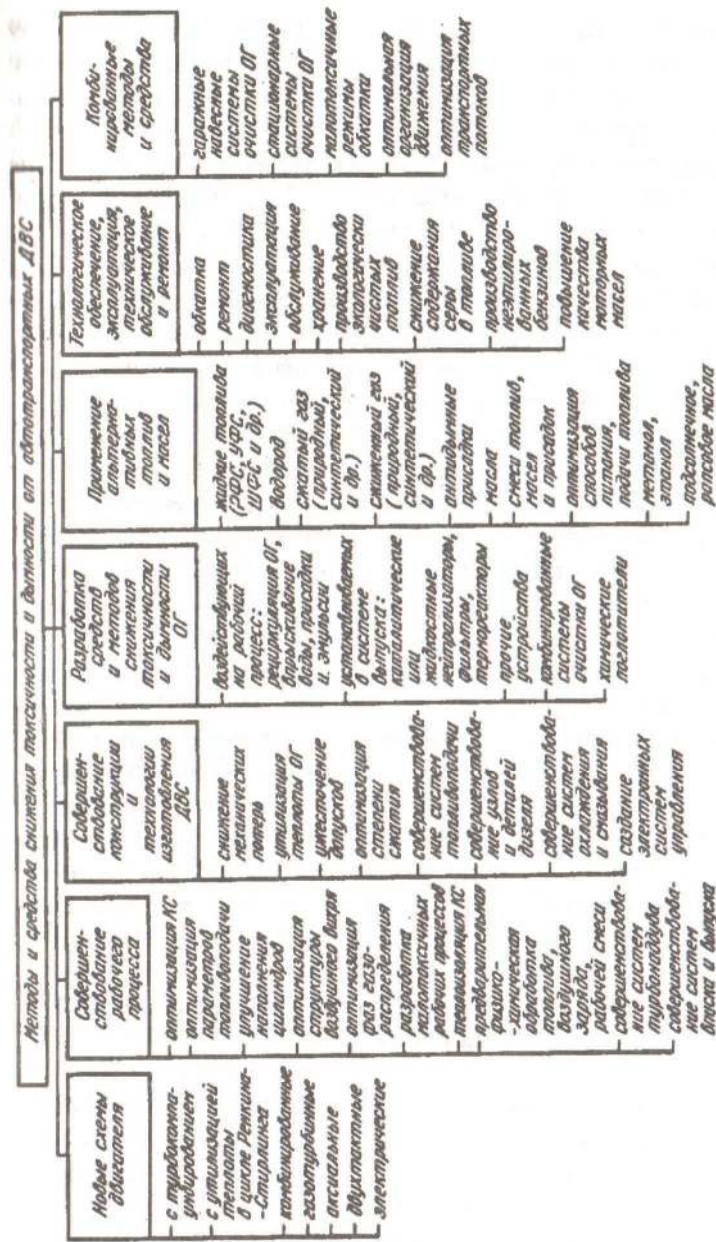


Рис. 1.3. Схема основных направлений и мероприятий по снижению токсичности и дымности ОГ автогазотракторных ДВС

Для перевода дизелей на работу по газожидкостному циклу требуются незначительные переделки и перерегулировки двигателя. Необходимо установить смеситель на впускном трубопроводе. В зависимости от принятой схемы регулирования устанавливают заслонки (дроссели) и соединяют их с регулятором. Степень сжатия остается неизменной. Подбираются оптимальные регулировки установочного угла опережения впрыскивания топлива и подачи запальной порции жидкого топлива, которая может оставаться неизменной или меняться в зависимости от нагрузки или частоты вращения. Изменения в регуляторе касаются в основном изменений в конструкции привода дроссельных заслонок и установке или ограничителей подачи запального топлива, или переключателей вида топлива (газожидкостный или дизельный процесс). В таком исполнении газожидкостный дизель одинаково пригоден как для работы на газе с запальной порцией ДТ, так и по чисто дизельному процессу, что является одним из существенных преимуществ модернизации. Второй способ хотя и не исключает полностью применение ДТ, но вместе с тем позволяет доводить его экономию до 80...90%, при снижении токсичности ОГ [41...47].

Сопоставляя два основных способа перевода дизеля на работу на газообразном топливе, следует констатировать, что применительно к четырехтактным тракторным дизелям, наиболее простым и экономичным, позволяющим применять метод не только на вновь проектируемых и выпускаемых дизелях, а и на уже находящихся в эксплуатации, является способ работы двигателя по газодизельному процессу и подаче газа в такте впуска с воспламенением газозо-душной смеси от запальной порции ДТ, подаваемого штатной топливной аппаратурой в конце такта сжатия [6, 24].

### 1.2.2. Применение природного газа в дизелях в РФ и за рубежом

В бывшем СССР в послевоенные годы увеличилось число работ, направленных на перевод дизелей для работы по газодизельному процессу. Так для речных газоходов, оборудованных газогенераторными установками, выпускались газодизели ЗД6-ГД [34]. При эксплуатационных испытаниях газодизели потребляли 14,7...16,8% ДТ по сравнению с чисто дизельным процессом. Для стационарных

и передвижных установок выпускался дизель 1Д6-ГД [34]. Наиболее серьезные работы по переводу дизелей В2 на работу по газодизельному процессу закончилась созданием газодизелей В2-300 ГД и В2-450 ГД. Для тепловозов был создан газодизель на базе дизеля Д-50 (Д-55) [34]. Для буровых установок был создан газодизель ГД-700. Кроме этого исследована работа по газодизельному процессу дизелей М-601, 6Ч-36/45 [32]. Кроме этого в СССР был переведен на газ дизель "Шкода" 8С-230Р.

В разные периоды переводом дизелей на газ занимались институты НАМИ, НАТИ, ЦНИДИ, ЦНИИ МПС, МВТУ им. Баумана и различные предприятия. Результаты теоретических работ и экспериментальных исследований отражены в работах: Аксенова Д.Т., Васильева Ю.Н., Вырубова Д.Н., Генкина К.И., Гуревича Н.А., Гольдבלата И.И., Долганова К.Е., Кайдалова А.А., Кеймаха Я.И., Ксенофонтова С.И., Коллерова Л.К., Кудряша А.П., Лебедева С.Е., Мазинга Е.К., Мансфельда Г.Г., Мараховского В.П., Мурашова О.Д., Муталибова А.А., Основенко Н.Е., Пятниченко А.И., Равкинда А.А., Самоля Г.И., Струнге Б.Н., Субоча Н.И., Чудакова Е.А. и других [30...46].

В настоящее время в странах СНГ и РФ ведутся работы по переводу дизелей на природный газ в институтах НАМИ, ВНИИГАЗ, Киевском автодорожном, МАДИ, Вятской сельхозакадемии, Институте проблем машиностроения АН Украины. Большой объем автомобилей КамАЗ, с системой питания дизелей на сжатом природном газе, выпускает АО КамАЗ [47]. В РФ планируется перевести на газ более 80 тыс. автомобилей с дизелями.

Особый интерес представляют последние работы по переводу дизелей на газ в США, ФРГ, Франции, Англии, Японии, Италии и Новой Зеландии. В Англии газожидкостные дизели выпускают с наддувом и без наддува [48, 49]. Внесенные изменения в конструкцию позволяют получить ту же мощность, что при работе по чисто дизельному процессу. Выпуском газодизелей занимаются фирмы «Нордберг», «Фербенке-Морз», «Делаваль-Энтерпрайз», «SEMT-Пилстик», «Чикаго-Пневматику», «Зульцер» и другие.

Газодизель «SEMT-Пилстик» [50] представляет собой двухтопливную модификацию газодизеля РС-2, применяемого в качестве стационарного или судового агрегата. Газодизели выпускаются с турбонаддувом в V-образном исполнении. При переводе дизеля на

газожидкостный процесс степень сжатия снижается с 13 до 10,7 путем изменения головки поршня. Газодизель C7V40/60DG фирмы МАН имеет газотурбинный наддув, среднее эффективное давление до 1,1 МПа. Двигатель имеет газовпускные клапаны. Фирма «Зульцер» переводит на газ двухтактные дизели большой мощности. Аналогичные работы проводились и в бывшем СССР. Примером такой работы может служить исследование работы дизеля ГД100 [37]. Фирма Аллен на базе дизелей серии S37 выпускает газожидкостные дизели мощностью 1400...2700 кВт. В другой серии охвачен диапазон от 150 до 1100 кВт [51, 52]. Фирма Вертзила (Финляндия) по лицензии SEMT-Пилстик выпускает газожидкостные дизели серии РС2-Б с цилиндровой мощностью 441 кВт при частоте вращения 520 мин<sup>-1</sup> для работы на природном газе [53].

В работе [54] сообщается, что фирмой Fuji Diesel создан судовой дизель модели 6LG32X, работающий на природном газе. Дизель развивает мощность 1176 кВт при 600 мин<sup>-1</sup>,  $p_e = 1,485$  МПа. Два таких дизеля, построенных по заказу австралийской фирмой были установлены на судне и успешно прошли испытания. При пуске и маневрах в порту дизель работает только на ДТ, переключение на газ производится как в ручную, так и при помощи дистанционного управления. При возникновении отклонений от нормальной работы на газе, в том числе при значительном повышении температуры ОГ, пониженном давлении газа и воздуха магистрали, а также при нагрузках, меньших 30%, срабатывает автоматическое переключение с газа на ДТ; для предотвращения взрыва в картере при проникновении в него газа, в картере установлен датчик, по сигналу которого при критической концентрации картер заполняется инертным газом. Воспламенение газа обеспечивается подачей в цилиндр дизеля небольшого объема жидкого топлива.

В работе [55] сообщается о постройке фирмой Каррингтон Слипваус Ptg Ltd грузового судна с двумя дизельными двигателями моделями 6LG32X фирмы Fuji мощностью 1200 кВт каждый. Для пуска двигателя и воспламенения газа применяется до 5% дистиллятного топлива. В работе [56] сообщается, что в Австралии накоплен опыт эксплуатации судовых дизелей, работающих по газожидкостному циклу на сжиженном газе с подачей жидкого топлива 5...7% и отмечается, что эти дизели имеют более высокий к.п.д., чем газовые двигатели с искровым зажиганием. В работе [57] при-

водятся данные о создании на базе судовых дизелей Пилстик серии РСЧ-2V с S/D = 620/570, производимых японской фирмой NKK по лицензии, газожидкостной модификации для работы на природном газе. В таком дизеле несколько снижена степень сжатия с целью избежания стуков при работе на полной мощности. Дизель оборудован турбонаддувом. Всесторонние испытания шестицилиндровой модели на базе серийного дизеля показали, что доля жидкого запального топлива составила 10% от расхода при работе на ДТ.

Вместе с тем необходимо отметить, что работ по переводу дизелей малой размерности (автомобильных, тракторных) на работу на природном газе по газодизельному процессу недостаточно. Практически отсутствуют серийно выпускаемые модификации таких двигателей. Именно поэтому, очевидно, исследовательские центры и моторостроительные фирмы стали уделять внимание работам в этом направлении. В литературе [58] появились сообщения о том, что японская фирма Тойота приступила к разработке систем питания автомобильных дизелей, переводимых с ДТ на газ. Переоборудованию на природный газ по двухтопливной схеме был подвергнут четырехцилиндровый дизель с вихревой камерой Рикардо Комет МК-5 и серийный дизель объемом 1,47 л.с. с турбокомпрессором, устанавливаемый на экспериментальный автомобиль Викинг-4 фирмы Фольксваген. Отмечается, что оборудование дизелей системой питания на природном газе не представляет затруднений. Аналогичные работы проводятся в США, Канаде [59, 60, 61]. Так, в работе [62] описаны результаты исследований Аризонского университета в области использования природного газа для питания дизелей, работающих в сельскохозяйственных энергетических установках. Объектом исследований являлся трехцилиндровый высокооборотный дизель Форд 4000, объемом 3,29 л и степенью сжатия 16,5. Дизель оборудовался газовыми смесителями Impco с диффузорами различных сечений и специальной муфтой для регулирования момента впрыскивания топлива.

В работе [63] приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик газожидкостного дизеля при подаче на впуске пропана. Исследования проводили на лабораторном дизеле с неразделенной камерой сгорания, без наддува при степени сжатия 17,2. Часть опытов была проведена на природном газе. Запальная доза ДТ изменялась от 16 до 70% от номинальной цикловой подачи

при работе дизеля только на ДТ. Показано, что удельный расход топлива (по энергетическому критерию) существенно зависит от дозы запального ДТ и увеличивается по сравнению с  $g_e$  стандартного дизеля с уменьшением запальной дозы и при изменении нагрузки ниже 80% от номинальной.

В работе [64] рассматривается возможность использования газообразного топлива в автомобильном дизеле. Газ подавали во впускной трубопровод дизеля и вместе с воздухом сжимали. Воспламенение происходило за счет запальной порции ДТ. Регулирование количества газа производилось устройством, связанным с рейкой топливного насоса. При замещении газом 60...70% ДТ дизель развивал такую же мощность, как при работе только на ДТ, при этом несколько повышался эффективный к.п.д., снижалась дымность. Аналогичные результаты получены в работах [65, 66]. Анализ литературных источников показывает, что к настоящему времени наибольших успехов по переводу дизелей на газ добились двигателестроительные фирмы, специализирующиеся на выпуске судовых дизелей [67, 68].

### 1.2.3. Системы питания и регулирования при работе дизелей на природном газе

Для каждого варианта перевода дизеля для работы по газожидкостному процессу на природном газе, в зависимости от выбранного способа регулирования, разрабатывают свою схему систем питания и регулирования. Метод качественного регулирования предусматривает воздействие на состав горючей смеси путем установки дроссельного органа на газовпускном трубопроводе [6, 7, 32, 34]. Этот метод широко применяется в газодизелях [6, 7, 32, 34, 39...47]. Метод количественного регулирования заключается в том, что изменение мощности дизеля достигается путем изменения количества свежего заряда постоянного состава, поступающего в цилиндры [32, 34]. Однако при реализации этого способа возникает сильное дросселирование на впуске дизеля.

Расход дизельного запального топлива является одним из основных показателей газодизельного процесса. По данным исследований [32...34, 36] при работе дизелей с полной нагрузкой по газодизельному процессу надежное воспламенение газовой смеси

можно обеспечить путем впрыскивания 4...5% жидкого топлива от расхода при работе по дизельному процессу. Однако эту дозу необходимо увеличивать до 15...20% при работе на частичных нагрузках и переходных режимах из-за возрастающей неравномерности подачи топлива по цилиндрам и ухудшения условий воспламенения газовой смеси [35]. В зависимости от выбранной системы регулирования, количество запального ДТ может быть постоянным или переменным по нагрузке дизеля. При постоянной подаче (по величине) ДТ ее необходимо выбирать из условий надежной воспламеняемости газовой смеси на малых нагрузках. Наиболее совершенной является переменная подача жидкого топлива по нагрузке и частоте вращения коленчатого вала. В этом случае дизель запускают на ДТ, а при переходе на большие нагрузки увеличивают подачу газообразного топлива и уменьшают величину ДТ [35].

При создании газодизельных модификаций возможны, по данным работ [6, 7, 24, 32, 39, 42, 46], следующие варианты по применению топливной аппаратуры: использование серийной топливной аппаратуры; внесение в серийную топливную аппаратуру необходимых конструктивных изменений, обеспечивающих максимальное уменьшение дозы запального ДТ и сохранение максимальных подач для получения полной мощности на дизельном процессе; применение специальной топливной аппаратуры, рассчитанной на малые подачи запального ДТ. При этом независимо от схемы должны выполняться следующие условия [32]:

1. На номинальном режиме равномерность работы цилиндров, определяемая в основном цикловой подачей и работой топливной аппаратуры, должна быть такой же, как и у базового дизельного двигателя.

2. Максимальное и минимальное число оборотов холостого хода должно быть таким же, как и у базового дизеля. При этом степень неравномерности и преемственность должны сохраняться такими же, как и дизеля. Увеличение минимального числа оборотов холостого хода недопустимо, т.к. при этом ухудшаются пусковые качества двигателя, увеличивается износ дизеля и сокращается моторесурс.

3. Необходимо по возможности не усложнять схему управления двигателя при работе по газодизельному процессу.

У газодизелей приготовление газовой смеси осуществляется в специальном устройстве, устанавливаемом на впускном

трубопроводе. При помощи смесителя возможно регулировать качество и количество смеси, поступающей в цилиндры дизеля и обеспечивать оптимальные условия работы на газе. При разработке конструкции газосмесительных устройств необходимо учитывать следующие положения [30, 31, 36]: а) плотность газа на входе в газосмесительную систему является переменной величиной, зависящей в некоторой степени от характеристики редуцируемой системы, конструкции соединительного газопровода, нагрузки двигателя; б) во избежание снижения коэффициента наполнения газосмесительное устройство должно иметь минимальные гидравлические потери; в) газовый смеситель должен обеспечивать легкий пуск, устойчивую работу на холостом ходу, плавный переход к нужным режимам, хорошее перемешивание смеси на всех режимах работы и равномерное распределение по цилиндрам; г) принципиальное отличие заключается в том, что в смесителе воздух и газ имеют одинаковые агрегатное состояние и близкие по величине плотности; поэтому законы их истечения аналогичны; д) для обеспечения оптимального регулирования необходимо знать для каждого двигателя закон изменения коэффициента избытка воздуха в зависимости от нагрузки и частоты вращения; е) для успешной работы двигателя смеситель должен иметь устройство для корректировки состава газозоудшной смеси. Анализ экспериментальных данных показывает, что при переводе на газодизельный процесс для сохранения одинаковой теплоты сгорания по сравнению с дизельным процессом смесь должна быть обогащена, т.е. коэффициент избытка воздуха уменьшен. В связи с тем, что дизель имеет достаточно большой коэффициент избытка воздуха, требуемое обогащение может быть осуществлено и показатели рабочего процесса останутся в допустимых пределах.

В дизелях небольшой мощности целесообразно применять смесители, общие для всего двигателя. Применение такого газосмесительного органа обеспечивает равномерное распределение горючей смеси по цилиндрам и простоту ручной регулировки. Анализ литературных источников показывает, что существует значительное число конструкций смесителей, отличающихся оригинальными решениями [69...89]. Типичными смесителями, конструкции которых можно использовать в качестве основных для применения в газодизелях, могут служить следующие.

На рис. 1.4 представлен однокамерный смеситель для газового двигателя [36]. Смеситель снабжен дозирующим экономайзерным устройством. Основными частями являются корпус 5 воздушной горловины, корпус 7 смесительной камеры и входной газовый патрубок 1, в котором размещен экономайзер с пневматическим приводом. Между газовым патрубком 1 и приливом на корпусе 7 смесительной камеры расположены дозирующие шайбы 2 и 3. Работа смесителя протекает следующим образом. При частичных нагрузках двигателя газ из редуктора поступает через патрубок 1, отверстие экономичной регулировки в шайбе 3, обратный клапан 4 и отверстия диффузора 6 в смесительную камеру, откуда вместе с воздухом засасывается в цилиндры двигателя. Клапан экономайзера под действием разности сил от перепада давлений на мембрану 11 и от пружины 9, закрыт. В момент приближения дроссельной заслонки к положению, соответствующему полному открытию, разрежение в полости А, соединенной с впускным трубопроводом двигателем, снижается настолько, что пружина 9 открывает клапан 10, и газ начинает поступать дополнительно через отверстие мощностной регулировки в шайбе 2.

Общий вид дозатора-смесителя газа дизеля КамАЗ-7409 представлен на рис. 1.5 [47]. В средней части смесителя расположен диффузор из цинкового сплава с кольцевым подводом газа через 59 отверстий диаметром 2 мм каждое, расположенные в три ряда в шахматном порядке. Сам дозатор газа с приводом ограничителя максимальной частоты вращения газодизеля показан на рис. 1.6. Ограничитель максимальной частоты вращения имеет исполнительный механизм мембранного типа и прикрывает газовую заслонку, независимо от положения педали в кабине автомобиля. Сигнал на ограничитель поступает от индукционного датчика частоты вращения. Анализ конструкций смесителей и дозаторов показывает, что их отличия во многом зависят от размерности дизелей и их систем регулирования. Другими словами, для качественной работы системы дозирования и смешения, важное значение имеет система регулирования газодизеля.

Еще в 1946 году проф. Вырубов Д.Н. в работе [30] сформулировал основные принципы связи регулятора дизеля с дроссельными органами. При переходе на газожидкостный процесс: во-первых, должны быть обеспечены пуск дизеля и работа на жидком топливе.

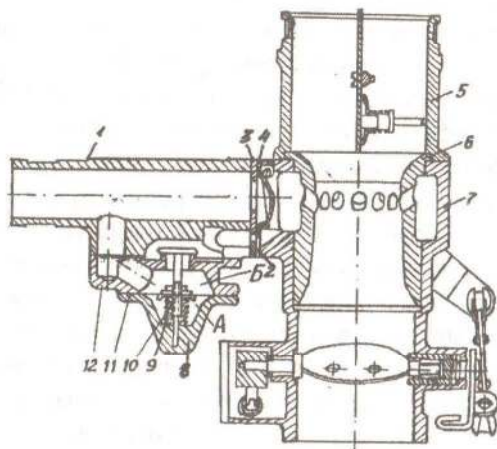


Рис. 1.4. Однокамерный газовый смеситель с периферийным вводом газа и экономайзером с пневматическим приводом

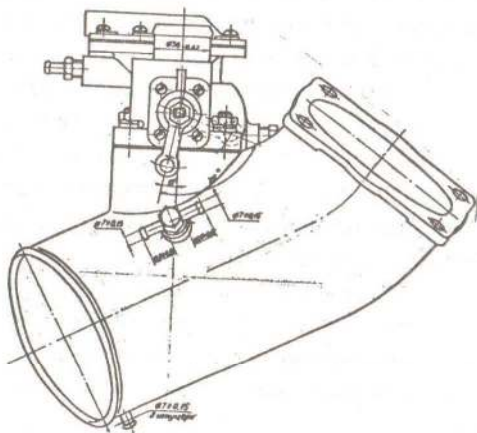


Рис. 1.5. Дозатор-смеситель газа дизеля КамАЗ-7409 (7409.4415010)

Во-вторых, работа протекает с воздействием регулятора на количество поступающего в двигатель газа, причем подача запального топлива остается постоянной, и должна иметься возможность ручного ее регулирования. В-третьих, в случае чрезмерного повышения частоты вращения двигателя регулятор должен автоматически выключить и газ и жидкое топливо. Вместе с тем должна быть обеспечена возможность быстрого выключения подачи газа во избежание разгона двигателя. Перечисленные требования к передаче от регулятора к регуливающим органам в случае перехода на газожидкостный процесс определяют следующую кинематическую схему:

1. Газовые дроссели находятся постоянно под воздействием регулятора, причем, однако, в схеме предусматривается упругое звено (кулиса, кулачковая или пружинная муфта) обеспечивающее возможность поворота дросселей до упора, установленного соответственно полному их закрытию, без посадки на стенки перекрываемого канала, и возможность дальнейшего перемещения муфты регулятора.

2. Связь регулятора с рейкой топливного насоса также осуществляется через подобное упругое звено, позволяющее ограничивать вручную максимальное количество подаваемого запального жидкого топлива, но не препятствующее воздействию регулятора на уменьшение дозы и полного выключения запального топлива в случае чрезмерного повышения частоты вращения двигателя. Конструктивное оформление ручного ограничителя должно допускать, во-первых, прецизионную регулировку дозы запального топлива и, во-вторых, возможность быстрого перехода к нормальному воздействию регулятора на рейку топливного насоса для работы на жидком топливе.

Конструктивное оформление упомянутых упругих звеньев должно быть таким, чтобы в процессе регулирования в системе по возможности не возникали дополнительные усилия на регулятор. Одновременно следует избегать наличия перекашивающего действия, которое может вызвать заедание отдельных элементов системы. В работе [30] также рекомендуется в качестве основного конструктивного решения посадка рычагов на оси с помощью клеммового соединения, допускающего возможность закрепления в любом положении. В настоящее время известно достаточное количество реализованных в практике систем регулирования газодизелей, в том числе и тракторных, однако как правило, для каждого типа топлив-



ного насоса необходимо разрабатывать новую систему регулирования [90...99].

В работе [91] предложена следующая схема регулирования при переводе дизеля М-17 трактора "Сталинец-65" для работы по газодизельному процессу. Воздушная заслонка (рис. 1.7), предназначенная для ручного управления, снабжена рукояткой и неподвижным сектором со шкалой для удобства фиксации ее положения. Газовая заслонка системой тяг и рычагов связана с регулятором. При желании воздействия на газ вручную, рычаг газового дросселя может легко отключаться от передачи к регулятору. Таким образом, в схеме было осуществлено качественное регулирование, как наиболее распространенное и наиболее удобное для двигателей, работающих на газе с присадкой жидкого топлива.

Патрубок у воздушной дроссельной заслонки присоединен к имеющемуся на двигателе воздушному фильтру, а патрубок у газовой заслонки - к трубопроводу, подводящему к двигателю газ. Для ограничения подачи жидкого топлива и возможности воздействия регулятора на газовую дроссельную заслонку при ограниченной подаче жидкого топлива в системе регулирования сделаны изменения. К валу рычага пружины регулятора был приварен дополнительный рычаг, конец которого был выпущен наружу через щель, которую пришлось сделать в кожухе регулятора. К этому концу рычага присоединяется одна из тяг передачи к газовой дроссельной заслонке. Для того, чтобы при ограничении подачи топлива не производилось задержки регулятора, в систему подачи к рейке топливного насоса включено упругое звено. Для этого регулируемая вильчатая тяга заменена новой, состоящей из двух деталей, стянутых между собой пружиной. Длину этой тяги, так же как и старой, можно регулировать, ввертывая одну часть ее в другую. Воздействие на топливный насос сохранено от имеющейся на двигателе рукоятки. Когда рукоятка ограничения подачи жидкого топлива находится в одном из крайних положений и не прикасается рычажком, присоединенным к ней внутри кожуха регулятора, к деталям передачи от регулятора к рейке топливного насоса, то регулятор воздействует на топливный насос и на газовую дроссельную заслонку. Если газ закрыт, то двигатель работает только на жидком топливе.

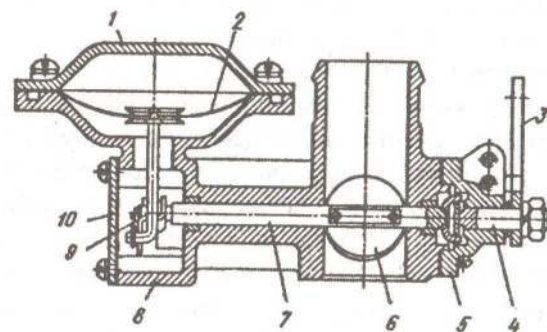


Рис. 1.6. Дозатор газа с исполнительным механизмом ограничителя максимальной частоты вращения газодизеля КамАЗ-7409

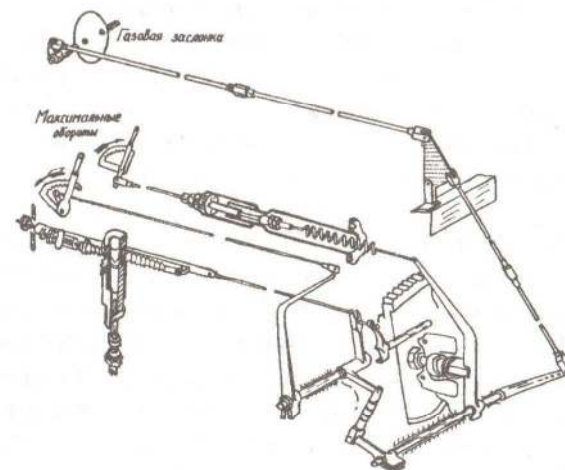


Рис. 1.7. Система регулирования подачи газа и жидкого топлива у газодизеля М-17

Если газ открыт, то двигатель получает и газ и жидкое топливо. Благодаря специальному расположению пружины выключение подачи жидкого топлива производится без участия пружины, а включение - через пружину. Поэтому в случае ненормального увеличения трения рейки - уменьшение подачи топлива будет происходить так же, как и в не переделанном двигателе. При ограничении подачи жидкого топлива регулятор, растягивая пружину упругого звена, будет воздействовать на газовую заслонку. Если же подача газа и жидкого топлива превысит подачу, необходимую для данной нагрузки, то регулятор, ввиду одностороннего ограничения подачи жидкого топлива, начнет уменьшать количество того и другого топлива. Поэтому при наладке системы регулирования, длина тяг между регулятором и дроссельной заслонкой подбирается такой, чтобы газовый дроссель закрывался при подаче жидкого топлива меньше необходимой для холостого хода.

Из современных отечественных разработок систем регулирования интерес представляет работа, выполненная под руководством проф. Долганова К.Е. для газодизелей семейства ЯМЗ [42, 43]. В этих системах используются стандартные узлы газовой аппаратуры, которая серийно выпускается для газобаллонных автомобилей. К новым деталям, для обеспечения работы газодизеля, относятся: дозатор газа, гидроусилитель, газоздушный смеситель, механизм переключения подачи ДТ, воздушная заслонка. Для обеспечения возможности всережимного регулирования частота вращения при работе и по газодизельному, и по дизельному циклам в конструкцию регулятора частоты вращения вносятся сравнительно небольшие изменения. Для этого муфта 1 регулятора (рис. 1.8) соединяется двуплечим рычагом с подвижной втулкой 4, установленной на рейке 2 ТНВД. Пружина 3 оттягивает рейку 2 влево, в сторону увеличения подачи ДТ. На рейке имеется выступ, на который действует рычаг 10 ограничения подачи запальной дозы ДТ, связанный тягой 12 с электромагнитным переключателем. Для работы по газодизельному циклу рычагом 10 отводят рейку 2 вправо, в сторону уменьшения подачи топлива, независимо от положения муфты 1, при этом пружина 3 растягивается. Втулка 4 остается неподвижной и между правым буртиком на рейке и втулкой 4 образуется зазор X. Во время работы двигателя по газодизельному циклу муфта 1 через главный рычаг 12 и гид-

роусилитель 7 воздействует на конический затвор дозатора газа 9, а рейка 2 остается неподвижной за счет перемещения втулки 4 по рейке в пределах зазора X. При возрастании частоты вращения на участке формирования регуляторной ветви дозатор 9 постепенно закрывается, уменьшая подачу газа. После того, как втулка 4 переместится на величину зазора X, рейка 2 тоже начинает перемещаться в сторону уменьшения подачи ДТ одновременно с продолжающимся уменьшением подачи газа. Длину телескопической тяги 8 регулируют так, чтобы полное закрытие дозатора газа под действием регулятора происходило раньше, чем полное выключение подачи дизельного топлива. Этим предотвращается попадание несгоревшего газа в выпускную систему двигателя при работе его в режиме принудительного холостого хода. Подача запальной дозы ДТ регулируется винтом 11, а подача газа - изменением длины тяги 7. Скоростной режим задается водителем путем изменения предварительного растяжения пружины 6 с помощью педали 5 управления двигателем. Для переключения на дизельный цикл рычаг 10 поворачивают против часовой стрелки, рейка освобождается и под действием пружины 3 перемещается влево до устранения зазора X. Одновременно с этим замыкаются контакты выключателя 14, установленного в цепи электромагнитного газового клапана (на рисунке не показан), который выключает подачу газа и двигатель начинает работать на одном ДТ. Для остановки двигателя надо сначала выключить подачу газа, а затем с помощью рычага 15 - подачу ДТ. Система питания двигателя ДТ остается без изменения. Переключение с газодизельного цикла на дизельный производится на ходу дизеля с помощью электрического переключателя, расположенного на щитке приборов в кабине водителя.

На рис. 1.9 показана схема системы питания газом газодизелей ЯМЗ-236 и 238. Сжатый природный газ (максимальное давление газа 20 МПа) хранится в восьми баллонах 1, разделенных на две группы. В каждой группе имеются баллонные вентили 2 и 18, через которые газ поступает к магистральному вентилю 4 и далее в одноступенчатый газовый редуктор 5 высокого давления, в котором давление газа снижается до 0,95...1,10 МПа.

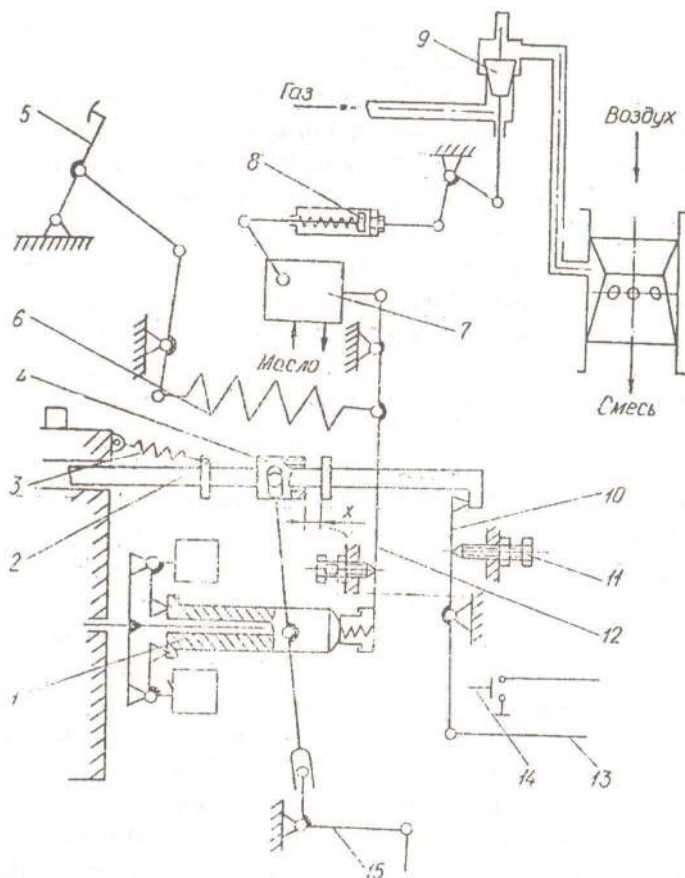


Рис. 1.8. Принципиальная схема всережимного регулятора газодизелей семейства ЯМЗ

Редуктор подогревается жидкостью, подводимой к нему из системы охлаждения двигателя. На выходе из редуктора установлен предохранительный клапан, отрегулированный на давление открытия 1,7 МПа. Из этого клапана газ отводится по трубке 17 к крыше кабины водителя. Из редуктора газ проходит к электромагнитному клапану 6 и далее в двухступенчатый газовый редуктор 16 низкого давления, в первой степени которого давление га-

за понижается до 0,16...0,22 МПа, а во второй практически до атмосферного (5...7 мм рт. ст.). Из второй ступени газ поступает через дозатор 10 в газоздушный смеситель 8 с диффузором. Затвор дозатора газа связан телескопической тягой с силовым рычагом гидроусилителя 12, расположенного на корпусе регулятора 13 частоты вращения, который установлен на ТНВД 7. Переключение на подачу запальной дозы ДТ производится электромагнитом 14. Давление газа в баллонах 1 измеряется манометром 2, а во второй ступени редуктора низкого давления - манометром 15. По трубке 9 передается разрежение из газоздушного смесителя в разгрузочное устройство редуктора низкого давления, выключающее подачу газа при неработающем двигателе.

Система питания и регулирования газодизеля ЯМЗ-240ГД отличается от описанной наличием воздушной заслонки, установленной на входе в газоздушный смеситель для обогащения газоздушной смеси при уменьшении нагрузки и применением двух газовых редукторов низкого давления, включенных параллельно, так как производительность одного редуктора недостаточна для этого газодизеля. В газодизеле ЯМЗ-240Н1-ГД с газотурбинным наддувом имеются два турбокомпрессора, по одному на каждый блок цилиндра. Газ подводится от общего дозатора газа отдельно во впускные патрубки каждого компрессора, диффузоры не применяются. Интерес также представляет работа системы питания и регулирования трактора Т-150К, поскольку топливный насос типа НД представляет собой унифицированный насос для целого ряда дизелей [46].

Установленный на тракторе двигатель СМД-62 конвертирован в газодизель. Для этого ТНВД дополнен дозатором газа с гидроусилителем, а регулятор частоты вращения ТНВД конструктивно доработан (рис. 1.10). Снята серийная тяга 8. Между главным рычагом 1 регулятора и двуплечими рычагами 34 и 37 привода дозаторов плунжерных секций ТНВД установлен промежуточный механизм, состоящий из двуплечих рычагов 16 и 23, упругой тяги 19, рычага 25 ограничения перемещения дозаторов, электромагнита 30, тяг 7 и 22. Рычаг 25 взаимодействует с якорем 29 электромагнита посредством планки 26, в которой выполнен паз "а".

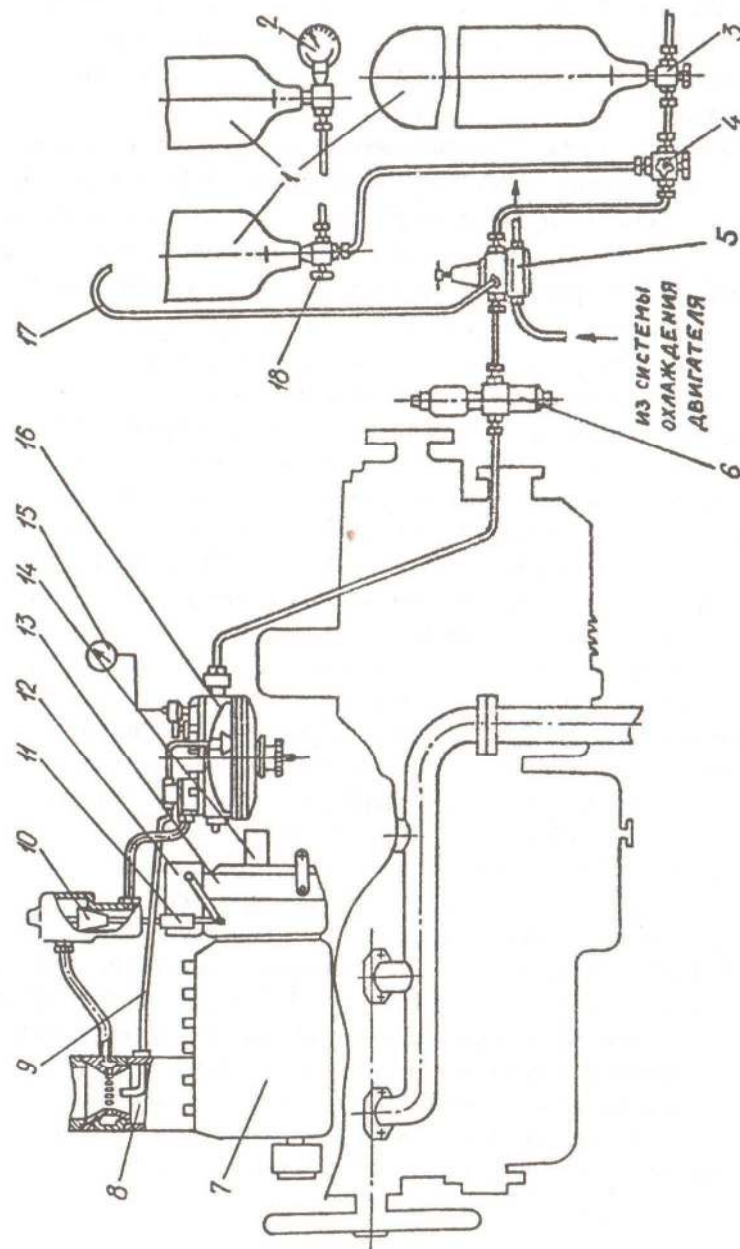


Рис. 1.9. Принципиальная схема системы питания газодизеля ЯМЗ-236ГД

Усилие от двуплечего рычага 16 через посаженный на его оси рычаг 18 и серьгу 17 передается на золотник 15 гидроусилителя 14, который через элементы привода воздействует на клапан 10 дозатора газа. При работе двигателя по дизельному циклу электромагнитный запорный клапан 6 (рис. 1.11) закрыт и масло из системы смазки двигателя к гидроусилителю не подается. Поршень 13 (см. рис. 1.10) гидроусилителя под действием возвратной пружины находится в крайнем правом положении и клапан дозатора газа плотно прижат к впускному седлу. Даже при случайном открытии электромагнитного запорного клапана 22 (см. рис. 1.11) газ не будет поступать в двигатель. Перемещение главного рычага 1 (см. рис. 1.10) регулятора через тягу 7 передается на двуплечий рычаг 16 и через упругую тягу на двуплечий рычаг 23. Так как предварительный натяг пружины 20 превышает сумму приведенного к оси тяги усилия от перемещения дозаторов 32, 35 и сил трения между элементами их привода, то тяга передает усилие как жесткое звено. При работе двигателя по дизельному циклу ток в электромагните отсутствует, якорь находится в нижнем положении и опирается на стопорное кольцо 28, штифт 24 планки занимает в пазу "а" среднее положение и паз не препятствует передвижению рычага 25 в рабочем диапазоне. (Положение деталей при работе двигателя по дизельному циклу в режиме номинальной мощности обозначено цифрой I.) При переходе на газодизельный цикл электрический ток подводится к катушке электромагнита, якорь поднимается вверх и планка нижним краем паза "а" поворачивает рычаг 25 на угол  $\alpha$  (из положения I в положение II). При этом рычаги 34 и 37 дозаторов поворачиваются против часовой стрелки (в сторону уменьшения подачи) на угол  $\varphi_{д}$ , а дозаторы 32 и 35 перемещаются вниз на величину  $h_{д}$ . Цикловая подача топлива секциями насоса уменьшается на величину, замещаемую газом. Из-за значительной разницы в жесткости пружин 20 и 2 упругая тяга "растягивается" на величину  $x$ , а промежуточный рычаг 16 остается неподвижным. Так как электрический ток одновременно подводится к электромагниту и электромагнитным запорным клапанам масла 6 и газа 22 (см. рис. 1.11), то эти клапаны открываются вместе с подъемом якоря. Масло из систем смазки двигателя под давлением поступает к гидроусилителю и перемещает поршень в положение, соответствующее

положению золотника 1 (см. рис. 1.10). Клапан дозатора газа отходит от седла корпуса 9, пропуская во впускной трубопровод двигателя необходимое количество газа. При уменьшении нагрузки на двигатель рычаг 1 поворачивается по часовой стрелке, а рычаги 16 и 18 против ( $q_{ц}$ ), при этом управляющий золотник гидроусилителя смещается вправо. Поршень гидроусилителя, "отслеживая" перемещение золотника 15, также передвигается вправо. Клапан дозатора газа приближается к седлу корпуса 9, зазор между ними уменьшается, и подача газа во впускной трубопровод двигателя снижается до величины, соответствующей нагрузке двигателя. Перемещение рычага привода приводит к уменьшению хода упругой тяги и не передается на рычаг 23, который под действием усилия пружины 20, воспринимаемого поршеньком штока 21, стремится повернуться по часовой стрелке. Однако его повороту препятствует планка, удерживающая через штифт рычаг 25. Дозаторы 32 и 35 остаются неподвижными и в цилиндры двигателя впрыскивается примерно постоянная ("запальная") доза ДТ, обеспечивающая воспламенение сжатой в них газозвушной смеси. Величина "запальной дозы" обусловлена углом  $\alpha$ , определяемым положением корпуса электромагнита относительно плиты 27. При ввинчивании корпуса высота  $h_{як}$  подъема якоря и угол  $\alpha$  уменьшаются, "запальная доза" увеличивается, при ввинчивании - высота  $h_{як}$  и угол  $\alpha$  увеличиваются, "запальная доза" уменьшается. При дальнейшем снижении нагрузки рычаг 1 регулятора продолжает перемещаться по часовой стрелке ( $q_{ц}$ ), зазор  $x$  в упругой тяге выбирается полностью ( $x = 0$ ) и она становится жесткой. При этом она, перемещаясь влево, поворачивает рычаги 23 и 25 против часовой стрелки ( $q_{ц}$ ). Планка не препятствует передвижению рычага 25, так как штифт свободно перемещается в пазу. Дозаторы 32 и 35 смещаются вниз, цикловая подача дизельного топлива уменьшается. При повороте рычага 1 по часовой стрелке перемещение его другого конца через тягу 7 передается рычагу 16, заставляя его вместе с рычагом 18 золотника поворачиваться против часовой стрелки ( $q_{ц}$ ). Под действием рычага 18 серьга 17 и золотник 15 перемещаются вправо, обуславливая перемещение вправо и поршня 13 гидроусилителя. Так как клапан прижат к седлу корпуса 9 дозатора, то перемещение поршня 13 возможно лишь в результате сжатия компенсационной пружины 11.

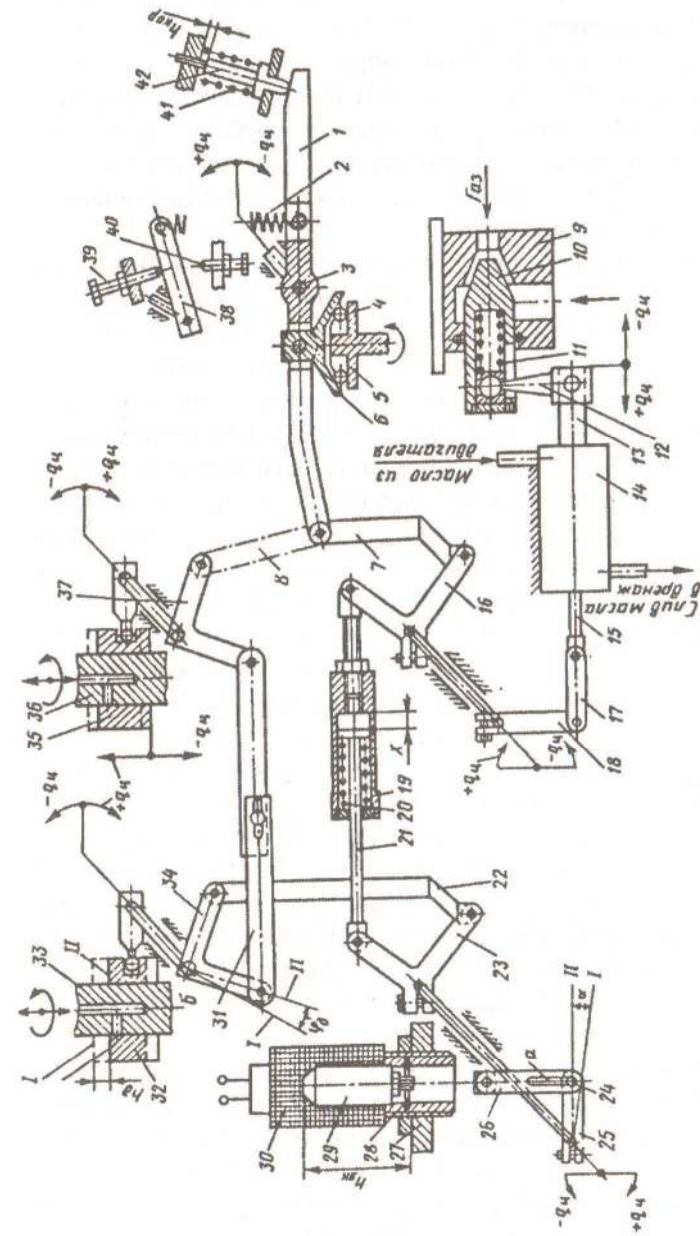


Рис. 1.10. Схема всережимного регулятора насоса высокого давления типа НД газодизеля СМД-60

Схема системы питания двигателя трактора сжатым природным газом и ДТ приведена на рис. 1.11. Секции баллонов подключены к системе параллельно. Баллоны заправляют газом через наполнительный вентиль 14. Газ из баллонов 11 под давлением 20 МПа через баллонный 13 и расходный 16 вентили, трубопровод 12 и гибкий шланг 18 поступает в газовый редуктор 20, где его давление снижается до 0,6...0,7 МПа. Далее через электромагнитный клапан 22 и совмещенный с ним фильтр газ поступает в дозатор 7, в котором давление газа снижается практически до атмосферного и он по трубопроводу 24 низкого давления через жиклер 1 поступает во впускную трубу двигателя (до турбонагнетателя). Проходя через турбонагнетатель, газ интенсивно перемешивается с воздухом, и газоздушная смесь под избыточным давлением поступает во впускной трубопровод, а затем в цилиндры двигателя. Система питания двигателя трактора ДТ сохранена без изменения. При работе двигателя по дизельному циклу газовая магистраль перекрывается электромагнитным клапаном 22, управляемым от переключателя режимов работы двигателя. Переключатель установлен на панели приборов трактора, на которой смонтированы также переключатель электромагнитного клапана подачи масла к гидроусилителю дозатора газа, включатель дополнительного электрооборудования системы питания двигателя газом и контрольные лампочки.

Двигатель запускают в режиме "Дизель" обычным способом и прогревают примерно до 60°C. Затем открывают баллонный и расходный вентили газа и включают дополнительное электрооборудование. Убедившись, что давление газа на выходе из редуктора находится в пределах 0,6...0,7 МПа, устанавливают включатель электромагнитного клапана подачи масла к гидроусилителю дозатора газа в положение "Вкл", а переключатель режимов работы двигателя - в положение "Газодизель". О работе двигателя по газодизельному циклу свидетельствует загоревшаяся лампочка зеленого цвета. Загорание лампочки красного цвета сигнализирует о снижении давления газа в баллонах ниже допустимого и необходимости перевода двигателя в режим дизеля. Для этого следует остановить трактор, выключив передачу и затормозив его стояночным тормозом. Затем закрыть баллонный и расходный вентили, довести частоту вращения вала дизеля до 1200...1500 мин<sup>-1</sup> и выработать газ из дозатора, редуктора высокого давления и трубопроводов.

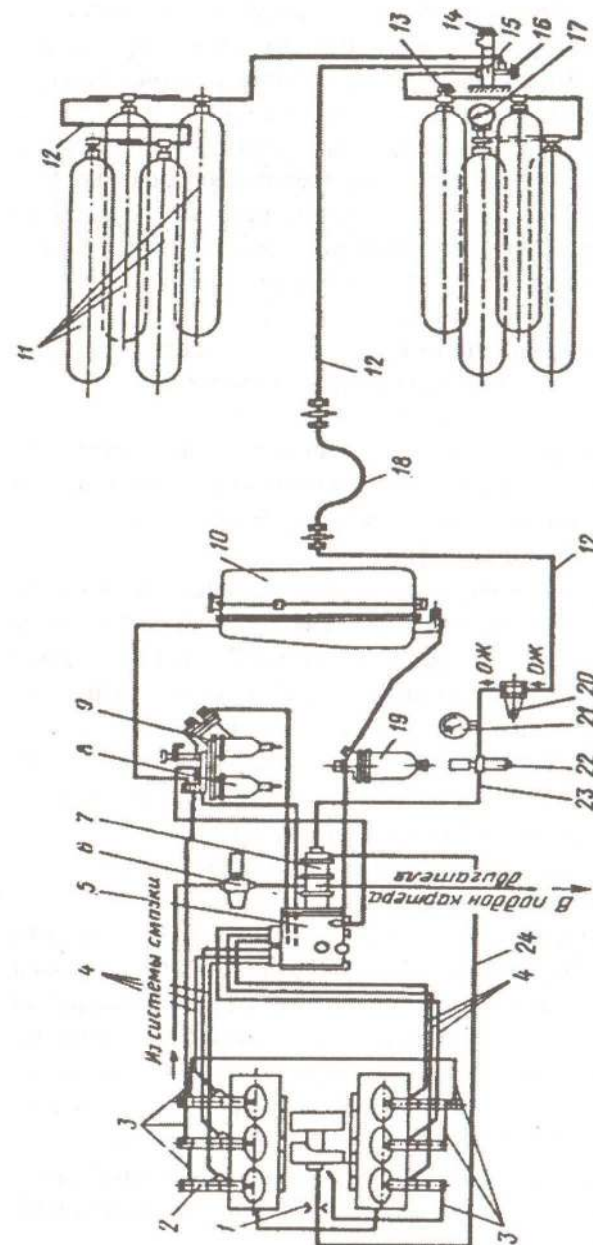


Рис. 1.11. Схема системы питания газодизеля СМД-60 трактора Т-150К

При этом давление газа после редуктора высокого давления должно снизиться до нуля при продолжающемся горении контрольной лампочки. После этого переключатель режимов работы двигателя необходимо установить в положении "Дизель", выключить электромагнитный клапан подачи масла к гидроусилителю дозатора газа и отключить дополнительное электрооборудование. При необходимости перевода двигателя с одного режима на другой для кратковременной работы достаточно установить переключатель режимов работы в соответствующее положение.

#### 1.2.4. Влияние подачи природного газа на процесс сгорания и тепловыделение в дизелях

Особенностью газодизельного процесса является то, что в цилиндре дизеля находится газозвушная смесь, которая сжимается до температуры, ниже, чем температура ее воспламенения, но выше, чем температура самовоспламенения ДТ.

В сжатую и нагретую до указанных пределов газозвушную смесь, с помощью штатной дизельной топливной аппаратуры, подается небольшое количество запального ДТ, которое самовоспламеняется. Самовоспламеняющиеся капли ДТ создают первоначальные очаги воспламенения газозвушной смеси одновременно во многих местах. Рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда и в нескольких местах одновременно. Благодаря этому одним из важных положительных особенностей газодизельного процесса является значительное расширение границ возможного обеднения рабочей смеси [32...34].

Газодизельный процесс, в отличие от дизельного, имеет свои особенности. Так общее количество тепла, выделившегося на участке видимого сгорания при обоих процессах, практически одинаково, но при газодизельном процессе количество тепла, выделившегося на участке с постоянным объемом больше, на участке с постоянным давлением - меньше, чем при дизельном процессе. Поскольку количество тепла, выделившегося на участке с постоянным объемом, характеризуется степенью повышения давления при сгорании -  $\lambda$ , а на участке с постоянным объемом - степенью предварительного расширения -  $\rho$ , то в соответствии с этим [32]:

$$\lambda_{гд} > \lambda_{д}, \rho_{гд} > \rho_{д}$$

В связи с увеличением  $\lambda$  максимальные давления сгорания, а также экономичность на газодизельном процессе (при прочих равных условиях) несколько выше, чем на дизельном.

Теоретические основы газодизельного процесса были впервые разработаны Лебедевым С.Е. [100]. Им введены такие основные понятия, как коэффициенты избытка воздуха в процессе сжатия  $\alpha_1^{гд}$ , в процессе расширения  $\alpha_2^{гд}$ , установлена взаимосвязь между ними и дан ряд основных зависимостей для расчета газодизельного процесса.

Расчеты, приведенные в работе [32] показывают, что газодизели могут работать на природном газе при коэффициенте избытка  $\alpha_2^{гд}$  на номинальной мощности и скоростной внешней характеристике в пределах 1,6...2,0. В этом случае для присадки запального ДТ с долей тепла, вносимым жидким топливом равной 0,15, коэффициент избытка воздуха в процессе сжатия равен соответственно 1,875 и 2,35. При степени сжатия 13...15 единиц и температуре всасываемого воздуха 20°C температура смеси в конце сжатия находится в пределах 500...600°C. Из известных зависимостей [32] температура зажигания смеси метана с воздухом при  $\alpha=1,75$  составляет 660°C. То есть работа по газодизельному процессу при такой степени сжатия возможна, т.к. температура выше температуры смеси в конце такта сжатия.

Следует отметить, что при уменьшении присадки ДТ для сохранения мощности необходимо меньшее  $\alpha_1^{гд}$ , т.е. требуется иметь в процессе сжатия более богатую смесь. Поскольку температура зажигания смеси метана с воздухом при понижении  $\alpha$  несколько возрастает, то для природного газа ограничений по степени сжатия нет. Таким образом, в газодизелях, работающих на природном газе, могут быть достигнуты весьма высокие технико-экономические показатели, на уровне дизельного прототипа.

На характер протекания газодизельного процесса существенное влияние оказывают три фактора: 1) доля тепла, вводимого с воспламеняющим жидким (запальным) топливом; 2) изменение коэффициента избытка воздуха (по газу); 3) изменение установочного угла опережения впрыскивания топлива [32, 33].

Так влияние доли тепла, вносимой ДТ, на характеристики рабочего процесса газодизеля В2-300 представлены на рис. 1.12. Уменьшение  $q$  не вызвало ухудшения экономичности только для режима 1, т.к. в этом случае  $\alpha_2^{гд}$  был минимальным из всех исследованных режимов. В связи с этим период задержки воспламенения не изменялся по сравнению с дизельным процессом и был постоянным. При этом происходило своевременное воспламенение газозвушной смеси с повышением давления при сгорании  $\lambda=1,8...1,9$  и достижением максимального давления сгорания до  $6,0...6,3$  МПа. При уменьшении нагрузки, когда коэффициент избытка воздуха увеличивается, уменьшение  $q$  приводило к значительному обеднению смеси. Такая смесь горела более медленно, чем богатая. Уменьшение  $q$  на режиме 2 с 1,0 до 0,25 приводило к возрастанию периода задержки воспламенения с  $2,8 \cdot 10^{-3}$  до  $3,6 \cdot 10^{-3}$  с. Сгорание при этом начиналось позднее, степень повышения давления при сгорании снижалась до 1,5. Максимальное давление сгорания падало с 6,3 до 5,3 МПа. Наиболее резко уменьшение  $q$  сказывалось на показателях процесса при более бедных смесях, соответствующих режиму 3. Отмечено, что индикаторный к.п.д. при изменении  $q$  с 1,0 до 0,25 снижался с 0,45 до 0,27. Доля тепла, вносимая с ДТ и равная 0,25, соответствует минимальным подачам ДТ, близких к холостому ходу дизельного процесса. Минимальную дозу ДТ при каждой нагрузке определяют как границу устойчивой работы двигателя, характеризующуюся резким увеличением неидентичности последовательных рабочих циклов и появлением пропусков воспламенения.

Влияние коэффициента избытка воздуха при постоянной доле тепла, вносимого жидким топливом на характеристики рабочего процесса дизеля В2-300 представлены на рис. 1.13 [32]. Для всех режимов принят оптимальный угол опережения впрыскивания топлива, соответствующий  $38^\circ$  до в.м.т. и минимальное количество тепла, вносимого жидким топливом (доля тепла  $q = 0,25$ ). Коэффициент избытка воздуха менялся до предела, когда отмечалось нарушение работы двигателя. Анализ характеристики показывает, что коэффициент избытка воздуха  $\alpha_2^{гд}$  уменьшался прямо пропорционально уменьшению  $\alpha_1^{гд}$ , независимо от режима, так как сохраняется постоянство  $q$ . Максимальные значения  $\lambda$ ,  $\rho_z$  и  $\eta_i$  достигаются для всех исследованных режимов при  $\alpha_1^{гд} = 2,2...2,4$ .

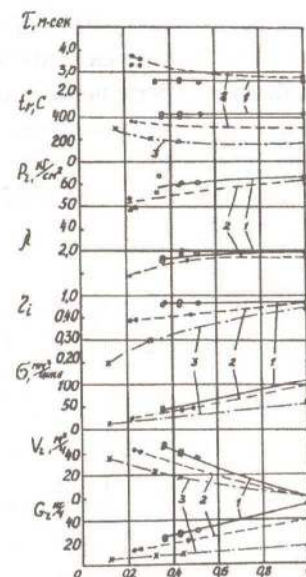


Рис. 1.12. Характеристики газодизельного процесса в зависимости от доли тепла, вносимой дизельным топливом:

- 1 -  $N_e = 300$  л.с.,  $n = 1500$  мин $^{-1}$ ;  
 2 -  $N_e = 200$  л.с.,  $n = 1250$  мин $^{-1}$ ;  
 3 -  $N_e = 120$  л.с.,  $n = 950$  мин $^{-1}$

Это объясняется тем, что соответствующее уменьшение  $\alpha_1^{гд}$  при уменьшении количества инертных газов, давало увеличение скорости сгорания. В связи с этим увеличивались степень повышения давления при сгорании и максимальное давление сгорания, т.е. обеспечивалось выделение большого количества тепла на участке сгорания при постоянном объеме и увеличение индикаторного к.п.д. Вместе с тем отмечалось, что уменьшение  $\alpha_1^{гд}$  обеспечивало увеличение скорости сгорания только до определенных пределов. При дальнейшем уменьшении  $\alpha_1^{гд}$  начинает сказываться недостаток кислорода для своевременного воспламенения и сгорания газозвушной смеси. Уменьшается скорость сгорания, максимальное давление сгорания, степень повышения давления при сгорании и индикатор-



ный к.п.д. Аналогичные выводы делаются в работе [39], где на природный газ был переведен дизель типа Д100 с прямоточно-щелевой продувкой и оппозитно расположенными двумя форсунками в каждом цилиндре. На рис. 1.14 и 1.15 приведены результаты расчета параметров рабочего процесса газодизельного двигателя типа Д100 на различных режимах, при разных соотношениях - природный газ - ДТ. Там же приведены результаты обработки индикаторных диаграмм, снятых с помощью индикатора МАИ-2 на соответствующих режимах.

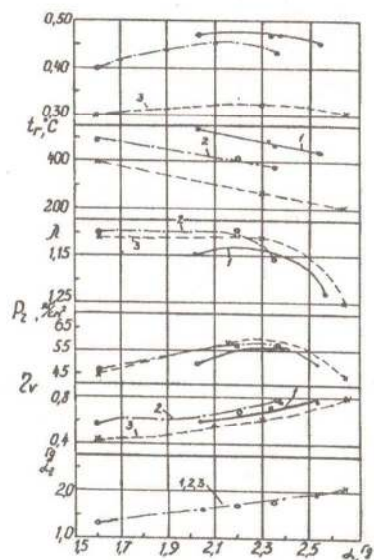


Рис. 1.13. Характеристики газодизельного процесса по составу смеси при постоянной доле тепла 0,25, вносимой запальным дизельным топливом:

- 1 -  $N_e = 300$  л.с.,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>;
- 2 -  $N_e = 250$  л.с.,  $n = 1250$  мин<sup>-1</sup>;
- 3 -  $N_e = 120$  л.с.,  $n = 950$  мин<sup>-1</sup>

Как видно, газодизельный процесс существенно отличается от дизельного. На номинальном режиме качество рабочего процесса практически соответствует дизельному циклу (см. рис. 1.14, кривая 1), однако при изменении состава смеси параметры начинают отли-

чаться. При обеднении смеси параметры газодизельного цикла резко ухудшаются. Проведенные исследования позволяют сделать некоторые выводы. Качество газодизельного рабочего процесса зависит в первую очередь от состава смеси ( $\alpha$ ). Близкое к дизельному качество рабочего процесса обеспечивается в узком диапазоне  $\alpha$ . Об этом свидетельствуют кривые  $X_i$  и  $\frac{dX_i}{d\phi}$ . Значение  $X_i$  на номинальной мощности практически соответствует аналогичному значению дизельного процесса (0,9). На 25% нагрузки наблюдается резкое падение значения  $X_{i \max} = 0,6$ ,  $\frac{dX_i}{d\phi}$ , особенно это касается максимума  $\frac{dX_i}{d\phi}$ .

По мере обеднения смеси при снижении мощности и частоты вращения резко падает  $X_{i \max}$ , изменяется характер  $\frac{dX_i}{d\phi}$ , который не соответствует некоторым исследованиям [101]. На продолжительном участке он выравнивается, отсутствуют привычные максимумы (один или два). Такой характер получен только в исследованиях [39]. Основываясь на приведенных данных, авторы делают следующие предварительные выводы. Прежде всего качество рабочего процесса зависит от состава смеси. Оно также определяется частотой вращения, мощностью и соотношением газ - ДТ.

При неизменных остальных параметрах изменение соотношения газ - ДТ (рис. 1.15, кривые 1 и 2) путем увеличения  $G_T$  до определенного значения повышается скорость сгорания и рабочий процесс улучшается. Отсюда следует важный вывод, что при обеднении смеси необходимо обеспечить оптимальное соотношение газ - ДТ. Аналогичные условия испытаний приводят иногда к качественно другим результатам [102]. Здесь при прочих равных условиях по мере увеличения доли газа в смеси деформируется график скорости тепловыделения - снижается до 0 первый пик неуправляемого сгорания, а второй растет, при 71% он становится единственным.

В исследовании [39] два пика не наблюдаются. Это можно объяснить только совершенно отличными условиями смесеобразования - подачей газообразного топлива на такте начала сжатия в сильный вихрь воздуха. Можно также сделать вывод, что для газообразного топлива при зажигании жидким топливом качество рабочего процесса может принципиально измениться.

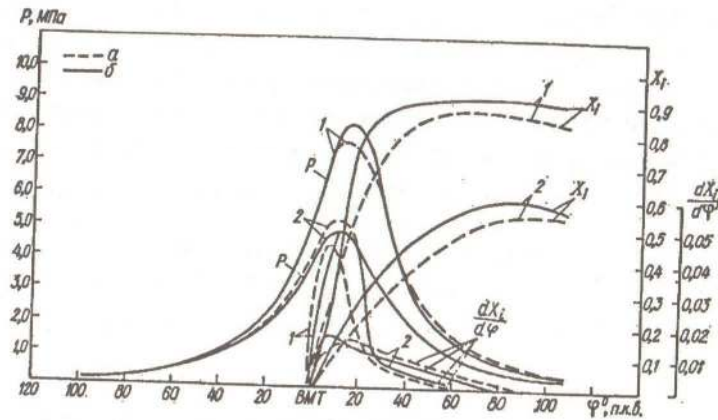


Рис. 1.14. Параметры газодизельного рабочего процесса а - расчет, б - эксперимент: 1 - номинальная мощность ( $G_T = 84\%$ ),  $\alpha = 2,37$ ; 2 - 25% нагрузки ( $G_T = 20\%$ ),  $\alpha = 10,06$

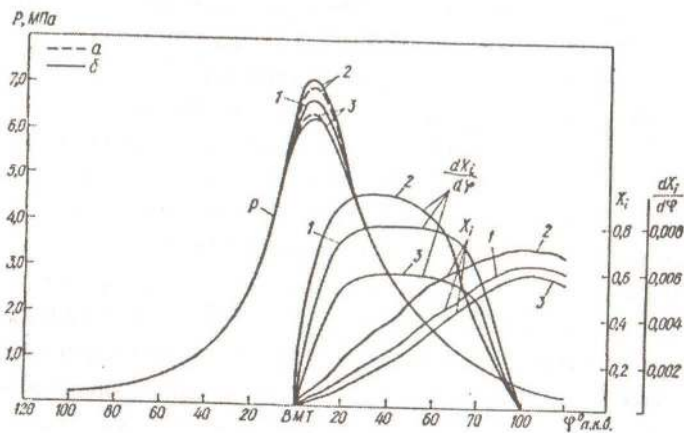


Рис. 1.15. Параметры газодизельного рабочего процесса а - расчет, б - эксперимент: 1 -  $n = 690 \text{ мин}^{-1}$ ,  $G_T = 48\%$ ,  $\alpha = 3,38$ ; 2 -  $n = 690 \text{ мин}^{-1}$ ,  $G_T = 65\%$ ,  $\alpha = 3,73$ ; 3 -  $n = 785 \text{ мин}^{-1}$ ,  $G_T = 63,5\%$ ,  $\alpha = 3,64$

Здесь неограниченное поле деятельности для математического моделирования, поскольку отсутствуют отработанные положения и принципы организации рабочего процесса и процесса смесеобразования.

Накладывают свой отпечаток результаты исследования газодизельного предкамерного двигателя [103, 104]. Приводятся данные, показывающие существенное влияние вихревого движения воздуха на качество рабочего процесса. При этом отмечается, что вихревое движение имеет значение не только в основной камере, но и в предкамере.

Получение совершенно отличных (качественно) результатов для предкамерного двигателя и двигателя с непосредственным впрыском доказывает сложность организации рабочего процесса, особенно процесса смесеобразования. В работе [104] наоборот, при обеднении смеси исчезает второй пик, скорость сгорания в первой фазе значительно возрастает. На рис. 1.15 [39] видно, что при увеличении дозы газообразного топлива до 65% при  $690 \text{ мин}^{-1}$  скорость сгорания возрастает, увеличивается коэффициент эффективного выделения теплоты  $X_{i \max}$ . Однако здесь же видно, что при практически неизменном соотношении газ - ДТ и увеличении частоты вращения на  $100 \text{ мин}^{-1}$  ухудшаются показатели рабочего процесса, такие как скорость тепловыделений и  $X_{i \max}$ , что объясняется только ростом или дальнейшим обеднением смеси. Это тем заметнее, чем меньше частота вращения [104...109].

Анализ влияния установочного угла опережения впрыскивания топлива на основные характеристики двигателей при работе по газодизельному процессу выполнялся в целом ряде работ [32, 33, 35, 36]. На рис. 1.16. представлены зависимости параметров двигателя и максимального среднего эффективного давления от установочного угла опережения впрыскивания топлива [36].

Установлено, что с изменением установочного угла опережения впрыскивания топлива меняется длительность задержки самовоспламенения. Так в работе [32] с уменьшением установочного угла опережения впрыскивания топлива сгорание начиналось позже, уменьшалась степень повышения давления при сгорании и максимальное давление сгорания, а также индикаторная мощность. Это объясняется увеличением периода задержки воспламенения при впрыскивании малых порций ДТ из-за уменьшения давления и

ухудшения качества распыливания и испарения топлива. Поэтому для лучшего использования рабочей смеси предварение впрыскивания ДТ при работе на газе следует увеличить.

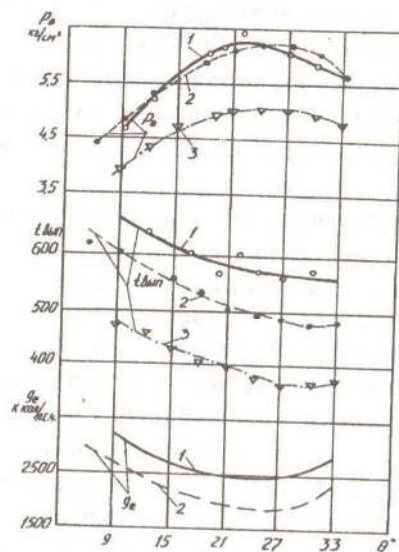


Рис. 1.16. Зависимость параметров дизеля от момента впрыскивания жидкого топлива при  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  и постоянных расходах жидкого и газообразного топлив: 1 - жидкое топливо; 2 - смесь нефтяного газа и жидкого топлива,  $\gamma = 0,44$ ; 3 - смесь сжиженного газа и жидкого топлива,  $\gamma = 0,48$

При этом с увеличением установочного угла опережения впрыскивания топлива увеличивается максимальное давление сгорания и скорость нарастания давления при сгорании. Пределом увеличению установочного угла служит максимальное давление и скорость нарастания давления при сгорании. Приведенные данные указывают на целесообразность изменения доли воспламеняющего топлива и установочного угла опережения впрыскивания топлива при регулировании нагрузки газодизеля. Однако это представляет значительные технические трудности и на практике обычно подачу запального топлива за цикл устанавливают постоянной и независимой от нагрузки, так же как и угол опережения впрыскивания топлива. При-

чем  $q$  определяют из условия достаточно устойчивой работы на холостом ходу, а  $\Theta$  - из условия обеспечения максимального давления в цилиндре [33].

### 1.2.5. Влияние подачи природного газа на эксплуатационные показатели дизелей

В настоящее время имеются исследования, посвященные влиянию подачи природного газа на эксплуатационные показатели дизелей различной размерности [5...7, 32...39, 41...46, 66, 104...106, 110...112]. Так на рис. 1.17 представлена нагрузочная характеристика газодизеля В2-300А ГД на частоте вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  [32]. На газодизельном процессе при снижении мощности с 300 до 60 л.с. расход запального ДТ уменьшался с 10 до 5,5 кг/ч и расход газа с 56 до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . К.п.д. двигателя на газодизельном процессе значительно меньше, чем на дизельном, что объясняется обеднением смеси с понижением нагрузки. На рис. 1.18 представлена скоростная характеристика газодизеля В2-450А ГД. Расход ДТ составляет 13...17%. Эффективный к.п.д. газодизельного процесса выше, чем у дизельного.

В результате испытаний было установлено, что при угле  $32^\circ$  до в.м.т. максимальное давление сгорания не превышало  $8,0 \dots 8,5 \text{ МПа}$ , температура ОГ находилась в пределах  $480 \dots 520^\circ\text{C}$ , эффективный к.п.д. равен 38% при расходе ДТ  $12 \text{ кг/ч}$ , что составляет около 17% по сравнению с расходом при работе только на жидком топливе. При увеличении угла опережения до  $34^\circ$  до в.м.т. максимальное давление сгорания доходило до  $8,5 \dots 9,0 \text{ МПа}$ , температура ОГ снижалась до  $460^\circ\text{C}$ . Экономичность практически не менялась. Уменьшение угла опережения впрыскивания топлива до  $28^\circ$  вызывало повышение температуры ОГ до  $550 \dots 580^\circ\text{C}$ , максимальное давление сгорания равнялось  $7,5 \dots 8,0 \text{ МПа}$ . Экономичность несколько ухудшалась.

В связи с этим для модификации В2-450А ГД был принят угол опережения впрыскивания  $32^\circ$  до в.м.т., т.е. такой же как и базового дизеля В2-450 А.

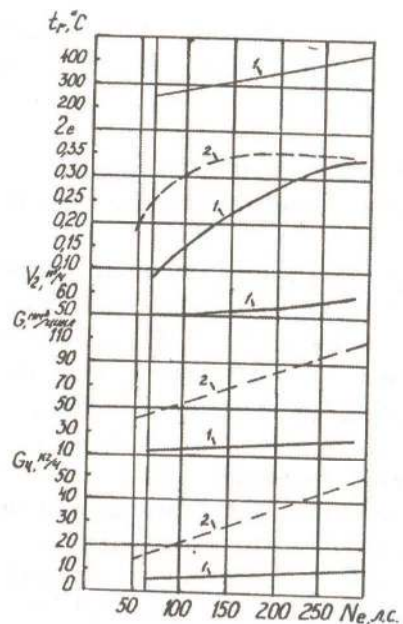


Рис. 1.17. Нагрузочная характеристика газодизеля В2-300А ГД при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ : 1-газодизельный процесс; 2-дизельный процесс

Большой интерес в настоящее время представляет подача природного газа в современные автотракторные дизели [6, 7, 41...46, 110...112]. Так в работах под руководством проф. Долганова К.Е. [42...44, 110, 111] исследовалась подача природного газа в дизели семейства ЯМЗ и его влияние на эксплуатационные показатели.

Для определения влияния дозы ДТ на токсичность, дымность ОГ и эффективный к.п.д. двигателя были проведены исследования на 6-цилиндровом газодизеле ЯМЗ-236 ГД, конвертированном из дизеля ЯМЗ-236. Паспортная мощность брутто дизеля ЯМЗ-236 равна 132 кВт при  $2100 \text{ мин}^{-1}$ . При контрольной проверке перед началом исследований была получена мощность 125,1 кВт при расходе топлива 31,2 кг/ч, коэффициенте наполнения цилиндров 0,81 и дымности ОГ - 25...30%. Во впускной патрубке газодизеля ЯМЗ-236 ГД был установлен газозвоздушный смеситель с диффузором.

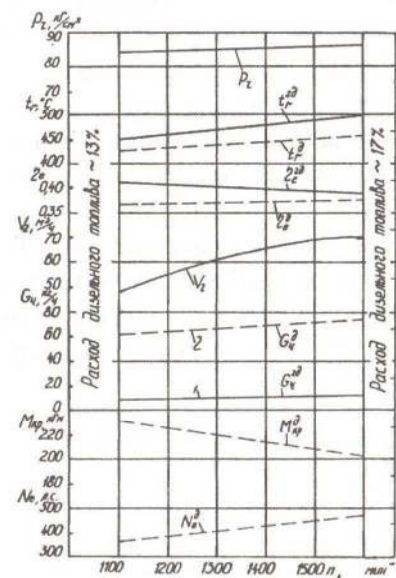


Рис. 1.18. Внешняя характеристика газодизеля В2-450А ГД: 1 - газодизельный процесс; 2 - дизельный процесс

Газ поступал в диффузор под действием разрежения в нем через 60 отверстий диаметром 2 мм, расположенных в три ряда равномерно по окружности диффузора в наиболее узкой его части диаметром 50 мм. При работе по дизельному и газодизельному циклам установочный угол опережения впрыскивания был одинаковый и равнялся  $18^\circ$  до в.м.т. Этот угол является оптимальным для серийного дизеля ЯМЗ-236.

При исследованиях применялись сжатый природный газ по ГОСТ 27577-87 и летнее ДТ по ГОСТ 305-82. Сравнение показателей работы двигателя производилось по нагрузочным характеристикам, снятым при дозах ДТ 32,50 и 72% от подачи на номинальном режиме в базовом дизеле, равной 31,2 кг/ч, а также при работе газодизеля по дизельному циклу.

На рис. 1.19 представлены нагрузочные характеристики снятые при номинальной частоте вращения  $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ . На них показано изменение часовых расходов  $G_T$  дизельного топлива,  $V_T$  природного

газа и эффективного к.п.д.  $\eta_e$  в зависимости от эффективной мощности  $N_e$  двигателя. При снятии нагрузочных характеристик регулятор частоты вращения был включен, поэтому изменение подачи топлива происходило под его воздействием. Чтобы сохранялась постоянная частота вращения, после очередного изменения нагрузки вручную корректировалось положение рычага управления регулятором. Из графиков видно, что по мере увеличения нагрузки сначала при выключенной подаче газа увеличивается подача ДТ до заданной запальной дозы, т.е. двигатель работает по дизельному циклу, а затем подача ДТ остается постоянной и изменяется подача газа, т.е. двигатель переходит на работу по газодизельному циклу.

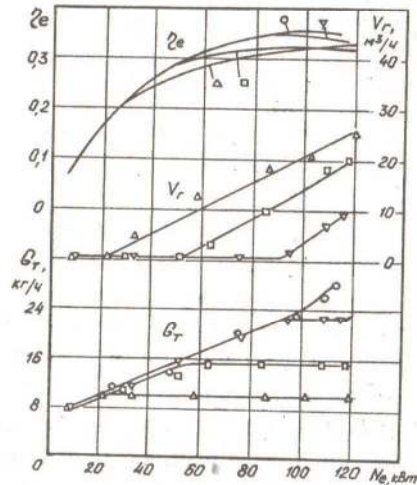


Рис. 1.19. Нагрузочные характеристики газодизеля ЯМЗ-236 ГД при  $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ : — доза дизельного топлива, %; ▽ - 74; □ - 50; △ - 33; ○ - дизельный цикл

С момента перехода на газодизельный цикл эффективный к.п.д. становится меньше, чем при работе по дизельному циклу. Это объясняется меньшей скоростью сгорания газозвушной смеси и большей неполнотой сгорания по сравнению со сгоранием топливозвушной смеси в дизельном цикле. При работе газодизелей с небольшой запальной дозой ДТ это проявляется наиболее сильно на

малых нагрузках и холостом ходу, когда газозвушная смесь особенно бедная. Это видно из рис. 1.20, на котором показаны зависимости  $\eta_e$  от мощности  $N_e$  у дизеля ЯМЗ-240 и газодизеля ЯМЗ-240 ГД при  $n_d = 2100 \text{ мин}^{-1}$ . Запальная доза ДТ равна 20%. При полной мощности эффективный к.п.д. у дизеля и газодизеля одинаковый, а по мере снижения мощности к.п.д. газодизеля становится значительно меньше. При этом резко возрастают выбросы углеводородов, в основном несгоревшего метана. При увеличении дозы ДТ двигатель на этих режимах работает по дизельному циклу, но при переходе на газодизельный цикл эффективный к.п.д. становится больше, что видно из рис. 1.20. Влияет это и на содержание токсичных компонентов в ОГ.

На рис. 1.21 показано изменение содержания углеводородов, оксидов углерода и оксидов азота в ОГ, а также дымности по нагрузочным характеристикам. При работе по дизельному циклу содержание  $C_mH_n$  в ОГ незначительное и не превышает 0,04%. При работе по газодизельному циклу оно возрастает с момента включения подачи газа. Чем меньше запальная доза ДТ, тем резче и до большей величины возрастает содержание  $C_mH_n$  в ОГ. Содержание CO при запальной дозе 72% практически такое же, как при работе по дизельному циклу. По мере уменьшения дозы ДТ содержание CO возрастает, но в пределах почти всей характеристики не превышает 0,2%. Только при максимальной мощности и запальной дозе 32% оно резко увеличивается до 0,56%. Содержание  $NO_x$  при нагрузках меньше 50 кВт во всех рассматриваемых случаях практически такое же, как при работе по дизельному циклу. На средних нагрузках при запальных дозах 32% и 50% оно меньше, с увеличением нагрузки при запальной дозе 32% содержание  $NO_x$  резко возрастает и достигает 2100 ч.н.м., а при запальной дозе 50% становится приблизительно таким же, как при работе по дизельному циклу. При запальной дозе 72% содержание  $NO_x$  меньше на небольшом участке вблизи максимальной мощности, а при максимальной мощности становится незначительно больше, чем при работе по дизельному циклу.

Максимальная дымность ОГ при всех трех величинах дозы ДТ значительно меньше, чем при работе по дизельному циклу. Для дизелей ЯМЗ-236 предельно допустимая норма дымности по ГОСТ

17.2.2.01-84 при  $2100 \text{ мин}^{-1}$  составляет  $N_{\text{доп}} = 35\%$  по шкале Хар-тридж.

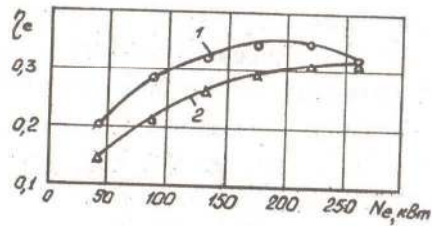


Рис. 1.20. Изменение эффективного к.п.д. дизеля ЯМЗ-240 (1) и газодизеля ЯМЗ-240 ГД (2) по нагрузочным характеристикам при  $n_d = 2100 \text{ мин}^{-1}$

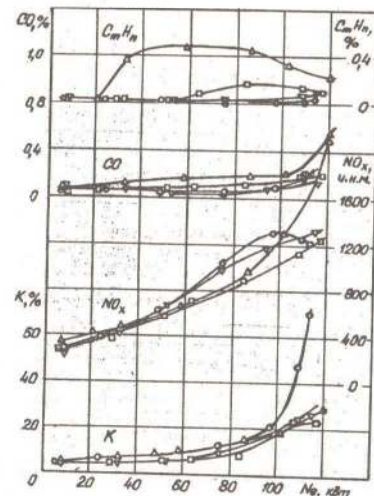


Рис. 1.21. Изменение токсичности и дымности ОГ газодизеля ЯМЗ-236 ГД по нагрузочным характеристикам при  $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ : доза дизельного топлива, %: ▽ - 74; □ - 50; △ - 33; ○ - дизельный цикл

При работе по газодизельному циклу фактическая максимальная дымность не превышает 30%, а по дизельному циклу она становится больше 35% при мощности 105 кВт и быстро возрастает до 70%. Максимальная мощность по допустимой дымности ОГ газоди-

зеля при работе по дизельному циклу меньше, чем мощность неконвертированного дизеля. Это объясняется влиянием диффузора, из-за которого уменьшается наполнение цилиндров воздухом. Этот недостаток устраняется при подводе газа в смеситель под избыточным давлением, так как в таком случае диффузор не требуется. Но при переходе на газодизельный цикл несмотря на наличие диффузора, дымность ОГ снижается в 2,4...2,8 раза, а мощность не уменьшается.

Аналогичные по характеру результаты получены на режиме крутящего момента при  $n_d = 1500 \text{ мин}^{-1}$ . В целом видно, что наименьшая токсичность ОГ получается при запальной дозе ДТ равной 50%, поэтому целесообразно задавать подачу ДТ в пределах 40...50% от номинальной подачи на дизельном цикле. Уменьшение расхода ДТ при этом по нагрузочной характеристике составит 40...60% и газ будет расходоваться наиболее экономично. Улучшаются условия работы распылителей форсунок при газодизельном цикле благодаря лучшему охлаждению их топливом. Аналогичные данные по токсичности ОГ газодизелей семейства КамАЗ представляет и ОГК завода КамАЗ [112].

## 2. СГОРАНИЕ И САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ

### 2.1. Феноменология смесеобразования, воспламенения и горения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля

#### 2.1.1. Феноменология смесеобразования в топливном факеле, впрыскиваемом в метановоздушную среду цилиндра газодизеля

Проведенные исследования [5...7, 24, 26, 113...140] позволяют трактовать феноменологию смесеобразования в топливном факеле, впрыскиваемом в МВС цилиндра газодизеля, следующим образом.

В процессе истечения из сопла форсунки 6 (рис. 2.1) струя углеводородного топлива разгоняется до больших скоростей с высоким значением  $R_e$ . После ее вылета происходит резкое расширение струи. Гидравлический удар, совместно с турбулентными пульсациями и волновыми колебаниями порождают силы, превосходящие поверхностное натяжение жидкости, что приводит к распаду струи на капли, каждая из которых движется с приданными скоростями [136, 137]. Капля жидкого топлива будет иметь скорость  $W_k$ . Теория распада струи топлива до сих пор не создана, но в первом приближении возможно использование эмпирических выражений [136, 137] для определения основных показателей частицы – диаметра каплей  $d_k$  и функции их распределения [137].

В устье 5 факела плотность капель исключительно высока, поскольку они образуются из целой струи при ее распаде, и вблизи распылителя будет иметь место их взаимодействие между собой по глубине и фронту. Известно [136, 137], что при расстоянии между каплями по фронту более  $6d_k$  и более  $12d_k$  по направлению движения, капли движутся независимо. Однако, при меньших расстояниях, взаимодействие капель между собой имеет место, что и является принципиальным отличием факела топлива от индивидуальных капель [124, 125].

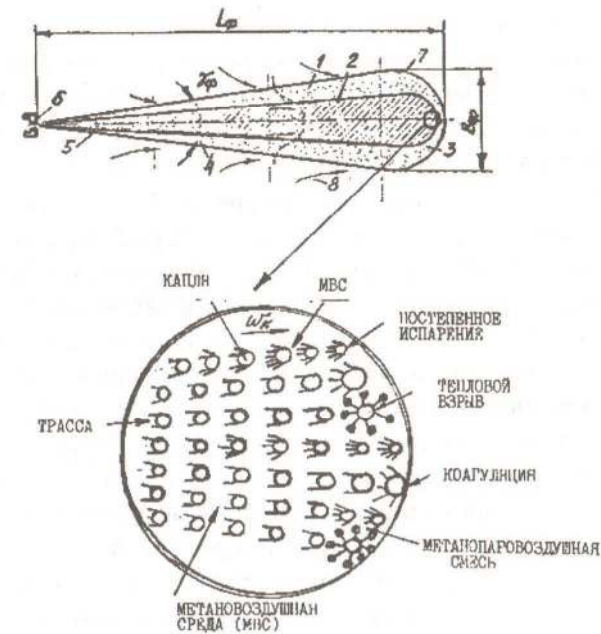


Рис. 2.1. Схема топливного факела при впрыскивании в МВС:  
1 - оболочка факела; 2 - ядро факела; 3 - фронтальная зона факела (фронт);  
4 - шлейф факела; 5 - устье факела; 6 - сопло форсунки; 7 - пограничный  
слой МВС; 8 - потоки МВС, вовлекаемые в движение

Вместе с тем не отрицается тот факт, что распределение капель неоднородно и по фронту, и по глубине, поэтому возможны области (периферия факела - оболочка 1), где расстояния между каплями больше критического, и области, где они существенно меньше (устье и ядро факела 2) [136]. С учетом зонной модели [136, 137] структуру нестационарного топливного факела, впрыскиваемого в МВС цилиндра газодизеля можно рассматривать следующим образом.

При вылете из сопла форсунки элементарного объема струи жидкого топлива равного:

$$dV_T = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot d_k,$$

где  $d_c$  - диаметр сопла, под действием внутренних напряжений она распадается на мельчайшие капли. Эти капли выстраиваются друг за другом и перемещаются с приданной им при впрыскивании скоростью по трассам, прокладываемым передними частицами. При этом расстояние, на котором движутся первоначально частицы друг от друга, не превышает  $d_k$  [136]. Распространяющаяся струя топлива состоит условно из двух областей: фронтальной зоны 3 факела (фронт) и ядра 2 факела. Кинетическая энергия первых жидких частиц расходуется на преодоление сопротивления среды, что проявляется в увлечении объемов прилегающих к каплям участков МВС и торможении самих частиц. При этом пограничный слой МВС 7 может приобретать скорость частиц, а за счет вязкости увлекаются и прилегающие слои МВС.

Следующие частицы жидкого топлива, сразу после образования, пристраиваются за впереди движущимися, поскольку за ними будет меньшее сопротивление - МВС приходит в движение. И хотя вторые частицы еще будут терять скорость, но уже не так быстро, как первые, и поэтому будут догонять передние. Потерянная кинетическая энергия этих частиц проявится как дополнительное ускорение прилегающих слоев МВС. Через какое-то количество времени скорость МВС на трассах приблизится к скорости жидких частиц и торможения частиц не будет. Эти частицы будут двигаться до фронтальной (фронтальной) зоны факела, где встречаются с невозмущенной МВС. Постепенно вся МВС в топливном факеле придет в движение с определенными микро- и макропрофилями скоростей. При этом будет сформирован массовый поток МВС, следующий за фронтальной зоной факела. При этом скорость фронта факела отождествляется со скоростью движения передней границы факела.

В ядре факела капли топлива, двигаясь по следам предыдущих, не испытывают сопротивления среды, что позволяет сохранять им скорость движения. Интенсивного теплообмена и испарения топлива в этот момент не происходит, но даже при недостатке МВС (окислителя), очевидно, имеет место диффузия метана на поверхности отдельных капель жидкого топлива.

Во фронтальной зоне факела начинается активное взаимодействие капель жидкого топлива с МВС, включающее как сило-

вое воздействие, выражающееся в торможении капель топлива, так и тепловое взаимодействие, приводящее к увеличению температуры капель. Это достигается или вследствие полного испарения головной частицы или столкновения последующих частиц с головной. При этом обязательным условием является изменение режима движения частиц - они влетают с огромной скоростью в невозмущенную МВС, имеющую начальную температуру, что приводит к интенсивному теплообмену, молекулярной диффузии метана на поверхности частицы и торможению частиц.

На основании имеющихся данных [126] можно утверждать, что в тех слоях факела, где плотность орошения велика, скорости спутного потока метановоздушной среды ближе к  $W_{впр.}$ . Другими словами скорость МВС  $W_T$  близка к скорости капель  $W_K$  и взаимное их скольжение незначительно:  $\frac{W_K}{W_T} \rightarrow 0$ . Там, где плотность

орошения мала, скорость спутного потока МВС меньше, поскольку увлекаются большие относительные массы такой среды. Это также сказывается на скорости жидких частиц, поскольку скорости скольжения различны. Отсюда можно сделать вывод [126, 127, 136, 137], что в топливном факеле, а точнее в его ядре с большими значениями орошения скорость скольжения мала и жидкие капли не тормозятся вплоть до фронтальной зоны факела. В то же время, по мере удаления от ядра факела в радиальном и осевом направлении скорость скольжения увеличивается и частицы жидкого топлива постепенно тормозятся. Одновременно с торможением первые капли жидкого топлива нагреваются поскольку коэффициент теплообмена велик из-за значительных относительных скоростей и малого диаметра капель [127]. В момент достижения капель температуры начала разгонки топлива -  $T_{ни}$  - начинается испарение топлива и процесс диффузии метана на поверхности капли усиливается. Во фронтальной зоне факела происходит сложный процесс взаимодействия МВС и капель жидкого топлива в соответствии с представлениями о капельном теплообмене и взаимной диффузии, но с той особенностью, что скорость скольжения равна  $W_{фр.}$ , температура МВС -  $T_0$ , а режим выкипания капли определяется фракционной функцией топлива [136]:



$$i = \frac{T_k - T_{ни}}{T_{ки} - T_{ни}},$$

где:  $T_{ни}$  - температура начала испарения топлива;  
 $T_{ки}$  - температура конца испарения топлива;  
 $T_k$  - температура жидких частиц.

При этом имеют место следующие особенности процесса парообразования топлива: пары срываются с быстро летящих капель, поэтому их отвод не лимитирует процесса парообразования. Если температура частицы выше  $T_{ни}$ , то испарение идет в режиме кипения фракции, причем пары топлива активно диффундируют в МВС.

Процесс не зависит от теплопроводности МВС, поскольку каждая головная частица жидкого топлива с огромной скоростью врывается в свежую среду, что обеспечивает постоянный максимальный тепловой напор, равноценный бесконечно большой теплопроводности. В тех слоях МВС, где плотность орошения мала (ближе к периферии факела), достаточно теплоты и для нагрева и для испарения капли. В тех слоях, где плотность орошения значительная (в ядре факела), теплоты для полного испарения капли может не хватить и возможно испарение только легких фракций с отложением в капле тяжелого фракционного остатка.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в ядре факела, где плотность орошения велика и капли не тормозятся, подвод теплоты к каплям незначителен и они прибывают во фронтальную зону непрогретыми. Кроме того, частичное испарение топлива и его смешение с МВС сопровождается локальным понижением температуры. В периферийной части факела, где плотность орошения невелика и имеет место значительное скольжение, частицы топлива в процессе торможения нагреваются и испаряются, поэтому зона смесеобразования паров топлива и МВС здесь растягивается на всю длину факела. Именно на периферии факела существенную роль в эволюции струи играет турбулентное смешение и вовлечение МВС в объем факела. Следовательно, можно предположить, что через некоторый промежуток времени после начала впрыскивания жидкого топлива в МВС в топливном факеле (см. рис. 2.1) формируются фронтальная зона и внутрен-

няя область (шлейф), имеющие определенные отличия в сущности физических процессов.

В шлейфе факела частицы топлива выстраиваются по трассам и двигаются без замедления, сопровождаемые потоком МВС при незначительном тепло и массообмене. Во фронтальной зоне факела частицы резко вступают в силовое и тепловое взаимодействие с МВС, поскольку встречаются с ее сопротивлением и которая находится лишь в стадии ускорения (а затем и встречного движения, вследствие охлаждения среды во фронтальной зоне).

В результате капли топлива, и сопровождающий их слой МВС начинают тормозиться, увлекая за собой вперед встречаемую МВС, что характеризуется бурным нагревом частиц топлива из-за скачкообразного коэффициента теплообмена и градиента температур. По мере прогрева может наступить момент, когда тепловой поток ослабнет вследствие уменьшения перепада ( $T_0 - T_k$ ), но, тем не менее, после достижения температуры начала кипения наступает процесс фракционной разгонки капли и нагрев остатков капель может происходить до  $T_0$ . Причем здесь имеет место ряд особенностей. При вторжении частиц во фронтальную зону резко меняется характер процессов тепломассообмена между частицами топлива и МВС, причем помимо подвода теплоты от свежей МВС может возникнуть теплообмен при коагуляции частиц и диффузии.

Коагуляция частиц возможна при относительно невысоких температурах МВС, когда нагрев и испарение во фронтальной зоне происходит недостаточно интенсивно и торможение МВС лидирующих частиц позволяет настичь их последующим частицам со скоростью ( $W_{впр} - W_{фр}$ ): скорость фронтального комплекса при этом повысится скачкообразно, приобретая средневзвешенное значение, а температура при этом понизится, принимая среднее значение смешения. Если средняя температура смешения выше начала разгонки топлива  $T_{ни}$ , то выкипают все легкие фракции с низкой температурой кипения, прибывшие с догоняющей частицей. Охлажденный от слияния жидкий комплекс нагревается от свежей МВС, снова затормаживается, в результате чего в него ударяется следующая частица жидкого топлива и цикл повторяется. В процессе неоднократного повторения циклов

замедления и ускорения жидких комплексов их средняя скорость (т.е. скорость фронта факела) постепенно падает, а температура (средняя) повышается вследствие непрерывного подвода теплоты от свежей МВС.

Основным уравнением, позволяющим описывать процесс теплообмена со средой, служит классическое уравнение теплообмена МВС и частиц топлива:

$$dQ = \alpha_{гж} (T_0 - T_k) \cdot dF_k,$$

где:  $Q$  - количество отдаваемой метановоздушной средой теплоты;

$F_k$  - поверхность частиц топлива (функция  $d_k$ );

$\alpha_{гж}$  - коэффициент теплообмена, определяемый в основном скоростью скольжения между частицами жидкого топлива  $W_k$  и МВС  $W_r$ , ( $W_k - W_r$ ) и диаметром частицы  $d_k$ .

При коагуляции частиц средняя температура  $T_k$  вычисляется как средневзвешенная. Также можно подсчитать и последующие циклы. Динамика торможения частиц (комплексов) описывается уравнением движения единичной капли [136]:

$$\frac{d \ln \omega_k}{dt} = 0.75 \frac{\gamma_r}{\gamma_k} \cdot \frac{C_k}{d_k},$$

где:  $\gamma_r$  и  $\gamma_k$  - удельные массы МВС и капель жидкого топлива;  $C_k$  - коэффициент сопротивления движению капель.

Процесс массообмена в частице определяется долей испаренного топлива в зависимости от ее температуры. Такое допущение об объемном испарении частиц возможно, поскольку МВС имеет высокую теплопроводность в момент внедрения в нее быстролетящей капли и с учетом того, что внутри малоразмерной высокотурбулизированной капли имеется высокая однородность температурного поля при проникновении теплоты внутрь со всех сторон поверхности. Вследствие этого капля кипит не только с поверхности, но и внутри.

Поэтому возможно испарение капель без коагуляции, когда тепловой поток велик ( $T_0$  высоко) и создаются условия для мгновенного испарения передней капли при торможении в МВС без слияния ее со следующей каплей. В этом случае, скорее всего, возникает тепловой микровзрыв капель и распад их на большое

количество еще более мелких частиц, разлетающихся в разные стороны во фронтальной зоне. И каждая микрокапелька, отлетая с большой скоростью, испаряется быстрее (температуры велики по условию) за счет увеличения поверхности раздела фаз, и  $\alpha_{гж} \approx \left(\frac{1}{d_k}\right)$ . При этом ускоряется диффузия паров жидкого топлива и МВС за счет гомогенизации в условиях увеличенной локальной турбулизации. Причем каждая последующая частица жидкого топлива сразу становится лидером, прокладываящим трассу, и вступает уже сама в силовое и тепловое взаимодействие с МВС. Такие циклы повторяются.

При этом необходимо отметить, что при больших  $\Delta T$  и  $\alpha_{гж}$ , когда интенсивное парообразование при кипении жидкости рождает силы превосходящие поверхностное натяжение и при температурах капли, соответствующей парообразованию 30% фракции, происходит микровзрыв. Причем в процессе парообразования сначала выкипают легкие фракции, а затем тяжелые и каждая фракция выкипает при своей температуре кипения. Поэтому за каплей остается облако паров, расслоенное по элементарному составу и температуре от  $T_{ни}$  до  $T_k$ . И температурное поле МВС в процессе теплообмена также будет переменным (от  $T_0$  и ниже).

Необходимо также учитывать, что пары топлива диффундируют с определенной скоростью и время диффузии по данным работы [137] одного порядка со временем полупарения частиц топлива размером 10...20 мкм. Очевидно, на лицо будет изменение суммарного коэффициента диффузии смеси и ее теплопроводности, значения которой обычно близки к значению коэффициента диффузии. Известно, что коэффициенты диффузии газа обратно пропорциональны молекулярной массе. Для смеси, где присутствуют пары топлива, метан и воздух, в связи с тем, что молекулярная масса метана  $\mu_{CH_4} < \mu_v$  суммарные коэффициенты диффузии и теплопроводности будут сильно изменяться с концентрацией горючего, что в последующем не может не сказаться на лимитировании скорости распространения пламени по МВС.

### 2.1.2. Феноменология воспламенения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля

Процессы, предшествующие воспламенению в дизелях, равно как и в газодизелях, трудно четко разделить на химические и физические, поскольку они тесно взаимосвязаны. У дизеля масса паров топлива, на ранних стадиях впрыскивания, в которых происходит химическая реакция, слишком мала, чтобы вызвать различимое горение и ранние стадии процессов перед воспламенением рассматривают как преимущественно физические процессы, приводящие к образованию горючей смеси. Более поздние стадии считаются преимущественно химическими преобразованиями, которые и ведут к воспламенению.

На основании работ Семенова Н.Н. и его школы [141...145], предложившего идею о цепном механизме окислительных реакций, Соколик А.А. разработал схемы одно- и многостадийного воспламенения углеводородных топлив в дизелях, дополнив их тепловым (по Аррениусу) механизмом [146]. Им выделены несколько основных стадий процесса. Сначала, при сравнительно низкой температуре, идут цепные реакции с накоплением перекисей до концентрации, при которой наступает их спонтанный распад с выходом альдегидов и некоторого количества оксида углерода (II). При этом распаде по всему объему заряда проходит холодное пламя. Давление в камере сгорания увеличивается незначительно, температура повышается на 100К, топливо отдает 5...10% располагаемой теплоты. Свечение обуславливается хемилюминесценцией (в основном химически возбужденных молекул формальдегида). За холодным возникает голубое пламя, которое по своей природе сходно с холодным, но отличается большим (до 40%) выделением теплоты. При этом количество продуктов неполного горения и активных частиц возрастает. Наконец, топливовоздушная смесь разогревается настолько, а концентрация активных центров становится такой, что создаются условия для появления и распространения турбулентного горячего пламени, при котором процесс окисления заканчивается и выделяется основная доля располагаемой теплоты. И хотя эта теория достаточно стройная, в ней строгая последовательность холодного, голубого и горячего пламени в определенной степени - условность.

В реальном дизеле можно также предположить, что отдельные комплексы реакций различных углеводородов и других соединений могут идти одновременно, начинаться - в различное время в зависимости от их природы и локальных температур (с учетом Махе-эффекта, обуславливающего неравномерность температурного поля), а также концентраций. Это особенно становится существенным, если принимать во внимание тот факт, что в газодизеле происходит воспламенение энергоносителей, принципиально отличающихся друг от друга по физико-химическим показателям. Это и их состояние: метан - газ, а дизельное топливо - жидкость. Это и показатели, влияющие на формирование струи, распад, испарение капель, перемешивание паров топлива, метана и воздуха (теплота испарения, коэффициенты диффузии метана и паров топлива в воздухе и др.). Это и химический состав метана и жидкого углеводородного топлива и их склонность к химическим преобразованиям с образованием активных радикалов и промежуточных продуктов. Это и другие моменты, которых не может быть при воспламенении в обычном дизеле. Например, возможность диффузии метана и углеводородного жидкого топлива на поверхности капли и последствия этого, приводящие к воздействию на воспламенение МВС. Вполне естественно предположить, что такие капли топлива быстрее подвергаются испарению, микровзрыву или другим процессам, происходящим в топливном факеле. После прохода фронтальной зоны метанопаровоздушный заряд в факеле будет иметь очень различные концентрации и состав смеси, температуру на различных локальных участках, что вызовет диффузионные потоки молекул метана, топлива и кислорода, зачастую встречные и турбулизованные, способные подсасывать в факел новые потоки МВС, но, в конечном итоге, постепенное выравнивающие концентрации и температуры в больших локальных объемах. Поэтому более богатые и холодные зоны прогреваются и обедняются, а бедные и горячие слои обогащаются и охлаждаются.

В метанотопливо-воздушных парах сразу после прохода фронтальной зоны начинаются цепные процессы окисления в условиях высоких температур, причем поскольку топлива (метана) в газообразном состоянии и в цилиндре и в факеле находится больше, а кинетические процессы окисления развиваются только

в газовой фазе, можно предположить, что они будут протекать значительно более интенсивно и, что более важно, в большем количестве локальных очагов. Поскольку процесс окисления углеводородов представляет сложную многоступенчатую цепную реакцию, в которую постепенно вовлекаются молекулы кислорода. МВС сама по себе гомогенна и она, в условиях высоких температур и давлений, может подвергаться низкотемпературному окислению еще до начала окисления жидких частиц ДТ, возможно предположение, что процесс воспламенения будет зарождаться там, где количество продуктов окисления метана достаточно для ускорения окисления жидких частиц, конечно при условии, что смесь здесь богатая. При отсутствии продуктов окисления метана в таком локальном участке процесс начнется, но, естественно, немного позднее.

В метанопаровоздушном расслоенном заряде диффузионный поток ускоряет кинетический процесс за счет переноса промежуточных продуктов окисления из одного слоя в другие, ускоряя таким образом последующие акты окисления, охватывая и те локальные участки, где из-за недостаточного количества продуктов разложения метана процесс окисления жидких частиц задерживается. Налицо имеется процесс окисления МВС с квазиобъемным характером с различной по концентрации глубиной превращений. К моменту воспламенения большая часть МВС должна быть насыщена активными и промежуточными продуктами окисления, представлять собой крайне неустойчивую кинетическую систему, готовую в любое мгновение при любом микроимпульсе к воспламенению и быстрейшему завершению реакции окисления.

На феноменологии влияния МВС на воспламенение в цилиндре газодизеля следует остановиться подробнее. Дело в том, что без впрыскивания ДТ в цилиндр газодизеля низкоцетановая МВС воспламениться не может, поскольку метан, имеющий компактную молекулу, требует для своего разрушения большую энергию активации. Но эта МВС, поданная через газоздушный смеситель-дозатор во впускной трубопровод газодизеля крайне гомогенна и движется по нему как одно целое, поскольку плотность воздуха и метана одного порядка. При этом каждая молекула метана может быть окружена как минимум стехиометриче-

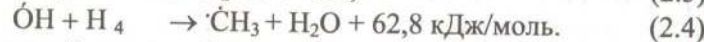
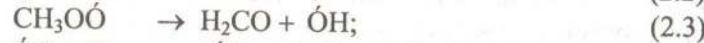
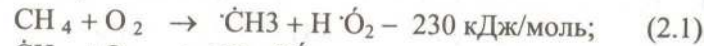
ским количеством молекул окислителя, что и обеспечивается нахождением их в газовой фазе. Такая гомогенная смесь к моменту впрыскивания топлива и, особенно, непосредственно в момент впрыскивания топлива, претерпевает сложные физико-химические преобразования. Сюда относятся: подогрев заряда во впускном трубопроводе, что может привести к увеличению скорости элементарных актов цепи воспламенения ДТ за счет температурного ускорения хода реакций; перемешивание МВС с остаточными газами от предыдущего цикла, что приводит к увеличению скорости течения элементарных актов за счет введения в заряд активных частиц, не вступивших в окислительные реакции, протекавшие непосредственно в цилиндре; увеличение влияния повышающихся давлений и температур в цилиндре при перемещении поршня и, что особенно важно, низкотемпературное окисление метана в присутствии достаточного количества окислителя. В результате низкотемпературного окисления метана образуются монорадикалы  $\dot{C}H_3$  и  $HO_2$ , а также радикалы  $\dot{O}H$  и  $\dot{H}CO$  и химически неустойчивые продукты  $H_2CO$  (формальдегид) и  $H_2O_2$  (перекись водорода). Такая МВС с исходными и промежуточными продуктами взаимодействия компонентов в элементарных актах может служить промотором воспламенения ДТ при его впрыскивании в цилиндр газодизеля в качестве запального топлива.

То есть начальные, промежуточные и конечные продукты окисления метана промотируют предпламенные реакции ДТ, вызывая его воспламенение. В этом случае оно возможно и при локальных концентрациях ниже запредельных по  $\alpha$ . Иными словами метан обеспечивает воспламенение ДТ.

Реальный процесс воспламенения сводится к предпламенному цепному реагированию топлива и окислителя, происходящему по общей схеме, но начинающемуся в локальных объемах в разное время с взаимодействием между собой в процессе турбулентной диффузии одинаковых исходных и различных промежуточных продуктов реакции. В цилиндре газодизеля происходит интенсификация горения низкоцетанового метана за счет промотирования последним воспламенения и ускорения распространения пламени по цилиндру. Рабочий процесс будет иметь особенности, заключающиеся в наличии нескольких мощных источни-

ков воспламенения, располагающихся в тех точках заряда, где созданы условия для самовоспламенения по показателям физико-химической, концентрационной и тепловой готовности этого локального объема. Эти источники воспламенения начинают действовать на МВС не одновременно, а в разное время в зависимости от готовности. Это дает возможность сформировать пламя без ограничений для крупномасштабного механизма сгорания из-за развитости поверхности горения, т.е. размеры формируемого пламени велики.

Если остановиться на цепях химических превращений, происходящих с топливом в цилиндре газодизеля, то очевидно в случае низкотемпературного окисления метана без искусственного инициирования, зарождение свободных радикалов из исходных веществ может происходить по следующему слаборазветвленному механизму, предложенному Семеновым Н.Н. и его сотрудниками [141...143]:



На первой стадии (2.1) соударяются две активированные молекулы метана и кислорода, в результате чего образуются два монаорадикала ( $\cdot\text{CH}_3$  и  $\text{H}\cdot\text{O}_2$ ). На следующей стадии (2.3) образуется гидроксильный радикал  $\cdot\text{OH}$ , который реагирует с метаном (2.4) и может реагировать с формальдегидом по уравнению:



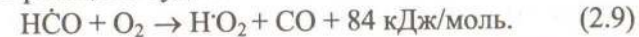
Причем константа скорости этой реакции много меньше константы скорости реакции между  $\cdot\text{OH}$  и  $\text{CH}_4$ . Образующийся по реакции (2.4) радикал  $\cdot\text{CH}_3$  вероятнее вступит в реакцию присоединения (2.2), имеющую энергию активации 8...12 кДж/моль, чем в реакцию замещения с метаном или формальдегидом. Радикал  $\text{CH}_3\text{O}\cdot$  неустойчив и распадается мономолекулярно по реакции (2.3) быстрее, чем вступит в реакцию замещения с метаном и формальдегидом. Наиболее вероятным актом, вызывающим разветвление, будет реакция:



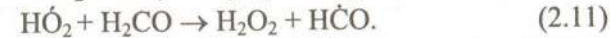
Эта реакция имеет энергию активации около 8 кДж/моль. По мере накопления в системе формальдегида радикалы зарождаются преимущественно по реакции (2.6). И только в этой реакции воспроизводятся две активные частицы. Наиболее вероятно, что образующийся в результате этого процесса радикал  $\text{H}\cdot\text{CO}$  разлагается на атом Н и СО по уравнению:



Суммарной реакцией будет:



Возникший радикал  $\text{H}\cdot\text{O}_2$  может вступить в реакцию замещения с метаном и формальдегидом:



При этом образуется соответствующий радикал и перекись водорода, наличие которой установлено экспериментально Семеновым Н.Н. Обрыв цепей обусловлен гетерогенной рекомбинацией на стенке радикала  $\text{OH}\cdot$ :



Приведенный выше механизм относится к начальной стадии воспламенения метана. Здесь активной частицей является формальдегид. Окончательное окисление до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  осуществляется на следующей стадии.

По описанному механизму можно, используя метод квазистационарных концентраций, получить для сравнительно низких температур (400...500<sup>0</sup>С) следующую кинетическую зависимость [156...160]:

$$\left( -\frac{dC_{\text{CH}_4}}{d\tau} \right)_{\text{max}} = k C_{\text{CH}_4}^2 \cdot C_{\text{O}_2},$$

где:  $k$  - константа, включающая  $k_0$  - константу скорости, экспоненту с соответствующим показателем степени и стериический фактор;  $C_{\text{CH}_4}$ ,  $C_{\text{O}_2}$  концентрация активных центров. В низкотемпературной области результаты экспериментов удовлетворительно характеризуются этим соотношением [156].

### 2.1.3. Феноменология горения дизельного топлива, впрыснутого в МВС цилиндра газодизеля

Горение МВС и ДТ, впрыскиваемого в цилиндр газодизеля, после воспламенения будет происходить как процесс нестационарного турбулентного горения, характеризуемый неуклонным ростом зоны горения, протекающий по крупномасштабному механизму ускорения пламени с количественным ростом ширины зоны пламени, что приводит к качественному изменению процесса. На эти закономерности накладываются условия формирования очага пламени, вследствие особенности предпламенных процессов, происходящих в низкотемпературной зоне пламени, низкотемпературного окисления МВС, протекающего по цепному механизму с образованием радикалов и энергетически насыщенных частиц с последующей их диффузией, физико-химических особенностей метана, как основной части МВС и его промотирующего действия на углеводородное топливо, которые не позволяют лимитировать в процессе ускорения крупные масштабы турбулентности [124, 125, 141, 144, 146, 152, 161...186].

Важнейшим показателем горения является нормальная скорость горения –  $u_n$ , которая зависит от концентрации окислителя в смеси, давления, температуры и, что особенно важно при рассмотрении вопросов горения в газодизеле, от наличия С-Н связи в молекуле исходного топлива и энергии активации горения метана. Для метана максимальная скорость распространения пламени в воздухе при атмосферных условиях [170]:  $u_n = 33,8$  см/с, при содержании топлива в смеси 9,96%. Влияние на  $u_n$  давления и температуры при горении  $CH_4$  очень сложное, причем последняя влияет более значительно. Так, по данным Хитрина Л.И. [187] для МВС максимальное значение  $u_n$  изменяется в 9,3 раза при возрастании температуры на 660К.

Энергия активации горения метана является макрокинетическим параметром фронта пламени. На основании зависимости  $u_n$  от давления Соколик А.А. [146] приводит результаты определения эффективного порядка реакции в зоне горения метановоздушной смеси:  $1 < n < 2$ . Авторы [170], приводят найденные значения  $E_{эфф}$  – эффективной энергии активации реакции горения

метана: по изменению  $U_n$  с  $T_0$  в интервале температур 293...953<sup>0</sup>С -  $E_{эфф} = 144,1$  кДж/моль; по изменению скорости реакции в пламени в интервале температур 1673...1973<sup>0</sup>С -  $E_{эфф} = 51,5$  кДж/моль; по изменению скорости реакции в пламени в интервале температур 1973...2273<sup>0</sup>С -  $E_{эфф} = 90,1$  кДж/моль.

Приведенные данные свидетельствуют, что распространение фронта пламени метана по МВС требует больших энергетических затрат. Вместе с тем Ксандопуло Г.И. в своей работе [188] указывает, что на величину  $E_{эфф}$  сильное влияние оказывает наличие примесей в ингибированных и неингибированных пламенах, которые могут при определенных условиях обеспечивать распространение фронта пламени и при меньших значениях  $E_{эфф}$  с учетом возможного промотирования горения. Для распространения пламени в газодизеле характерны критические явления, когда в локальных объемах в определенных случаях незначительные изменения давления, температуры или концентрации способны резко изменить скорость протекания процесса. Это соответствует теории пределов распространения пламени Зельдовича Я.Б. [186], исходя из зависимости температуры фронта от скорости его распространения при учете тепловых потерь и аррениусовской зависимости скорости распространения фронта от температуры горения. От концентрации топлива в смеси и его теплопроводности зависят верхний  $C_n$  и нижний  $C_n$  концентрационные пределы распространения пламени в газодизеле. Метан является более легким, чем воздух и кривые его сгорания (скорость пламени от концентрации метана) в МВС целиком лежат в тепловой области [124]. Составы смеси, характеризующие верхний концентрационный, стехиометрический и нижний концентрационный пределы распространения пламени в МВС существенно отличаются друг от друга. Для метана стехиометрический концентрационный предел распространения пламени в МВС  $C_{стех} = 9,5\%$  (об.),  $C_n = 5,0\%$  (об.), а  $C_b = 15,0\%$  (об.). При этом необходимо учитывать тот факт, что влияние увеличения давления на верхний концентрационный предел распространения пламени метана особое. Если при нормальных условиях для МВС стехиометрического состава  $C_n = 5,0\%$  (об.), а  $C_b = 15,0\%$  (об.), то при повышении давления до 40 МПа  $C_b$  возрастает до 46% [170]. Существенно влияет на концентрационные пределы распространения пламени метана в

метанокислородной смеси наличие кислорода. Так, при нормальных условиях  $C_n = 5,1\%$  (об.), а  $C_v = 61\%$  (об.). Концентрационные пределы распространения пламени в сложных горючих смесях  $C_n$  зависят от концентрации  $C_i$  компонентов и рассчитываются по правилу Ле-Шателье:

$$C_n = \frac{100}{\sum_i (C/C_n)_i}$$

Необходимой предпосылкой протекания процесса горения МВС в цилиндре газодизеля является, помимо необходимого уровня энергии активации, возможность соударения реагирующих молекул. Это условие выполнимо лишь в случае хорошего перемешивания метана, углеводородного топлива и воздуха, т.е. образования гомогенной смеси. В цилиндре газодизеля в объеме топливного факела будет иметь место турбулентный газовый поток, в котором наблюдается турбулентная или молярная диффузия. Однако и при турбулентной диффузии, приводящей к перемешиванию конечных объемов газа, процесс полного, т.е. молекулярного перемешивания заканчивается только за счет молекулярной диффузии. При молекулярной диффузии смешение газов определяется скоростью движения молекул и длиной их свободного пробега и оценивается коэффициентом молекулярной диффузии, который с увеличением температуры возрастает [161...166]. Для метана коэффициент молекулярной диффузии при  $0^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении составляет  $0,196 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сек}$  [161]. Турбулентная диффузия, имеющая место в цилиндре газодизеля, выражается в переносе молей газа в другую среду за счет турбулентных пульсаций, вследствие чего процесс перемешивания существенно интенсифицируется. В турбулентном потоке мгновенные значения локальных скоростей непрерывно меняются. Это равнозначно тому, что на усредненную скорость поступательного движения топливного факела накладываются направленные в разные стороны пульсационные скорости [167...170]. Здесь определяющей величиной будет средняя квадратическая величина пульсационной скорости и средняя длина пути смешения, который проходит элементарный объем газа по отношению к остальному газу, прежде чем он потеряет свою, отличную, скорость и очертание.

Интенсивность турбулентной диффузии неизмеримо выше, чем молекулярной, поскольку масштаб турбулентности в десятки тысяч раз больше длины пробега молекулы. Как отмечалось, и при турбулентной диффузии, завершающим процессом является молекулярная диффузия, поскольку перемещение элементарных объемов не может обеспечить равномерное смесеобразование на молекулярном уровне. Однако непосредственный контакт газов в исчезающе малых объемах приводит к огромному росту градиентов концентраций, вследствие чего заключительный процесс молекулярной диффузии протекает чрезвычайно быстро.

С учетом феноменологии смесеобразования в топливном факеле, впрыскиваемом в МВС цилиндра газодизеля и изложенную в разделе 2.1.1 и работах [5...7, 117...140, 170...226] метано-топливовоздушный заряд, образующийся после прохода фронта факела, с учетом вовлечения в движение струи МВС из окружающего пространства, молекулярной и турбулентной диффузией как в топливном факеле, так и в окружающем пространстве в осевом и радиальном направлениях с учетом закручивающегося потока, можно, принимая во внимание, что концентрационная неоднородность также будет иметь место, выделить ряд зон, где условия для горения МВС и ДТ будут существенно отличаться. Границы этих характерных зон носят условный характер и при турбулентном движении можно говорить лишь об устойчивости средних по времени границ, мгновенные же значения скоростей и концентраций непрерывно меняются.

Зона 4 (рис. 2.2) представляет собой зону преимущественно гомогенной МВС с избытком окислителя. Концентрация паров углеводородного топлива и МВС между зонами 1 и 5 распределена неравномерно, а локальные отношения  $\alpha$  (топливо/воздух) могут меняться от 0 до бесконечности. В зонах 4, 3 и 2 в локальных участках возможно содержание МВС и более верхнего концентрационного предела воспламенения и содержание МВС менее нижнего предела воспламенения. И все-таки в зоне 4 находится большее количество таких локальных объемов, где присутствует избыток окислителя.

Зона 3 характеризуется большим количеством локальных объемов, где испытывается недостаток окислителя и где в большей степени присутствуют продукты испарения жидкого углево-

дородного топлива и где процесс быстрого молекулярного перемешивания в ходе турбулентной диффузии осуществился раньше.

Зона 2 (оболочка факела), представляет собой зону с недостатком окислителя в целом по зоне и большим количеством локальных объемов, где в метанотопливоздушной среде находится достаточное количество преобразованного и подготовленного к сгоранию вследствие испарения, коагуляции и теплового взрыва жидкого углеводородного топлива, подвергнутого кроме всего воздействию турбулентной и молекулярной диффузии. Количество этих продуктов в зоне 2 больше, чем содержание метана, хотя локальные их соотношения могут меняться в широких пределах.

Зона 1 (ядро факела) характеризуется недостатком окислителя в целом по зоне и самым большим количеством локальных объемов, содержащих подготовленное к сгоранию углеводородное топливо в его смеси с метаном, но количество этого топлива, даже в локальных участках, превосходит количество метана.

Зона 5 отличается слишком бедной смесью, даже для поддержания горения МВС без углеводородного топлива и условно названа зоной догорания обедненной МВС (срыва бедного пламени). Размер зоны зависит от многих факторов, но в первую очередь от режимных.

С учетом феноменологии воспламенения МВС в цилиндре газодизеля изложенной в разделе 2.1.2 и с учетом исследований, проведенных в РФ и за рубежом [176...226] феноменологию горения ДТ и МВС в цилиндре газодизеля можно представить следующим образом. Процесс воспламенения МВС в цилиндре газодизеля будет зарождаться в локальных объемах, где количество продуктов окисления метана (низкотемпературного) достаточно для ускорения окисления жидких частиц углеводородного топлива при условии, что смесь богатая.

Исследования показали, что при горении смеси метана с воздухом химические реакции и тепловыделение в этом пламени начинаются при температурах, мало отличающихся от исходных, что позволяет делать выводы о существовании и роли низкотемпературной зоны пламени [170, 189].

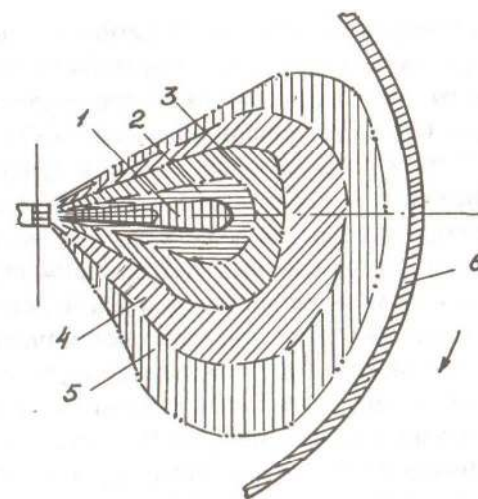


Рис. 2.2. Феноменология горения ДТ, впрыснутого в МВС цилиндра газодизеля: 1 – зона горения ядра факела; 2 – зона горения оболочки факела; 3 – зона воспламенения и горения МВС; 4 – зона горения МВС с избытком окислителя; 5 – зона догорания обедненной МВС (срыва бедного пламени); 6 – стенка цилиндра

Таким образом имеется достаточная вероятность того, что диффузия радикалов и энергетически насыщенных частиц в низкотемпературную зону с горючей смесью приводит, наряду с гибелью этих частиц к актам их воспроизводства и даже к актам разветвления. Следовательно, еще раз подтверждается необходимость учитывать превращения топливных смесей при температурах меньших, чем температура пламени [189]. В метанопаровоздушном расслоенном топливном заряде турбулентный диффузионный поток ускоряет кинетические процессы переноса промежуточных продуктов низкотемпературного окисления метана и их активные центры инициируют процессы воспламенения метанотопливоздушной среды в других, менее подготовленных, локальных объемах. С точки зрения соблюдения определенных условий и наложенных ограничений по подготовленности к воспламенению МВС и наличию окислителя этим требованиям наиболее соответствует зона 3. Именно здесь, к моменту самовоспламенения, находится большое количество локальных объе-



мов МВС, в которой присутствуют активные частицы и промежуточные продукты (химически неустойчивые) низкотемпературного разложения метана, в том числе монорадикалы  $\dot{C}H_3$  и  $HO_2$ , радикалы  $\dot{O}H$  и  $HC\dot{O}$ , формальдегид  $H_2CO$  и перекись водорода  $H_2O_2$ . В этих же локальных объемах присутствуют и продукты испарения углеводородного топлива. Причем таких локальных объемов больше на участках, примыкающих к зоне 2 (оболочке факела) и меньше на участках, примыкающих к зоне 4. То есть, в зоне 3 находится достаточно много локальных объемов с крайне неустойчивой кинетической системой, готовой в любое мгновение, при любом микроимпульсе к самовоспламенению. Это и происходит при повышении давления и температуры в цилиндре. Как только воспламенение МВС началось, небольшие независимые сильно турбулизованные фронты пламени начинают распространяться от локальных источников воспламенения и воспламеняют МВС вокруг них. Такую модель горения называют микрообъемной. Малые турбулентные объемы, какие имеют место в цилиндре газодизеля, позволяют обеспечивать быстрый процесс молекулярного перемешивания исходной смеси с продуктами сгорания. В тех объемах, где после смешения температура превышает температуру самовоспламенения и которые с точки зрения химизма процесса наиболее подготовлены к этому, смесь будет воспламеняться и сгорать по законам объемной реакции значительно быстрее. Образующиеся продукты реакции вновь смешиваются с исходной смесью, и таким образом происходит распространение пламени [169]. Такие микрообъемы распределены неравномерно по всей зоне турбулентного горения, не позволяют сформироваться мелкомасштабным фронтам, и будут способствовать развитости фронта пламени и формированию турбулентного факела с крупномасштабным ускорением из-за развитости поверхности горения. Это ускоряет горение МВС и расширяет пределы горючести, хотя для метана и характерна большая ширина зоны пламени, что должно приводить к развитости, в первую очередь, мелкомасштабного ускорения [124, 125]. После воспламенения в зоне 3 пламя распространяется к ядру факела 1 через зону 2 (оболочку факела). В этой зоне имеется достаточное количество локальных объемов с продуктами преобразованного углеводородного (жидкого) топлива, перемешанного с

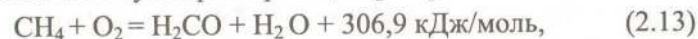
МВС. Возможно, наличие достаточно крупных капель топлива, которые нагреваются излучением от установившегося пламени и испаряются с еще большей скоростью. Повышение температуры также увеличивает диффузию паров из-за возрастания коэффициента молекулярной диффузии. Эти капли могут испаряться полностью и сгорать в пределах богатой смеси. Горение такой смеси в большей мере будет зависеть от турбулизации и развитости поверхности фронта пламени, чем от параметров этих капель.

Горение в зоне 1 (ядро факела) также характеризуется недостатком окислителя, но в большей мере, чем в зоне 2. Горение здесь в основном зависит от локального состава смеси, что в сильной мере обусловлено взаимодействием газодинамических факторов. Именно в ядре факела могут образовываться крупные капли, из-за относительно малого перепада давлений в конце впрыскивания. Дальнобойность струи в конце впрыскивания также резко падает. В шлейфе 4 (см. рис. 2.1) факела, расположенного ближе к устью 5 крупные капли топлива не могут попасть в зону с достаточным количеством кислорода. При этом необходимо учитывать, что температура в зоне горения уже достаточно высока и теплопередача к этим каплям очень большая, причем увеличивается доля нагрева излучением. Поэтому скорость испарения капель также высока, они подвергаются термическому разложению, а образовавшиеся частицы углерода сами горят, повышая температуру пламени и делая его светящимся. После воспламенения в зоне 3 (см. рис. 2.2) пламя будет также охватывать зону 4, где преимущественно находится гомогенная МВС с избытком окислителя в целом по зоне, но различными локальными отношениями топливо/окислитель. В этой зоне процесс горения будет определяться с учетом диффузионного горения МВС при турбулентном режиме, что также характеризуется отсутствием четкого деления на зоны продуктов сгорания, смеси воздуха с продуктами сгорания и смеси газов с продуктами сгорания. Эти зоны сливаются с зоной продуктов сгорания и во всем объеме происходит горение отдельных микрообъемов. При этом в части зоны 4, приближенной к зоне 3, предполагаются участки интенсивного горения МВС, в части зоны 4, примыкающей к зоне 5, горение из-за увеличивающейся бедности смеси ухудшается и по мере охвата зоны 5 горение прекращается. По структуре тур-

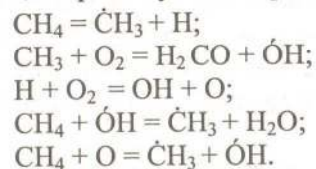
булентное диффузионное пламя напоминает микрообъемную модель турбулентного горения.

Для зоны 5 в связи с большой разбавленностью смеси скорость пламени для различных локальных объемов различна и самое незначительное изменение состава смеси из-за температуры и давления, турбулентности движения заряда или других факторов приводит к резкому изменению нормальной скорости пламени и срыву бедного пламени. Зона 5 практически очень мало поддерживает горение, а размер зоны во многом зависит от факторов, влияющих на изменение состава смеси. В связи с тем, что феноменология горения ДТ впрыснутого в МВС цилиндра газодизеля предусматривает горение больших объемов МВС на номинальных режимах работы газодизеля и у реального дизеля это приводит к увеличению скорости нарастания давления газов в цилиндре и "жесткости" работы газодизеля, необходимо подробнее остановиться на механизме горения метана при повышенных температурах ( $T > 900\text{K}$ ).

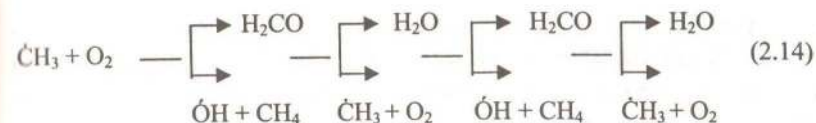
Лавров Н.В. предложил механизм горения метана при повышенных температурах, в котором процесс химического взаимодействия с кислородом рассматривается в сочетании с отдельными стадиями термического разложения метана [153, 163]. Формальдегид рассматривается как промежуточное соединение метана с кислородом. Горение метана состоит из трех стадий: неполное сгорание метана до формальдегида; разложение формальдегида; догорание окиси углерода и водорода. На первой стадии происходит образование формальдегида при неполном сгорании метана по суммарной реакции [153]:



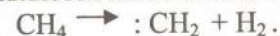
через следующие промежуточные реакции:



Сгорание метана на первой стадии определяется протеканием следующей цепной реакции:



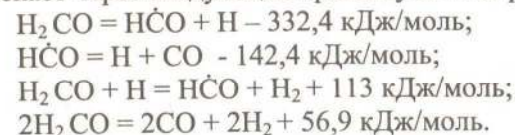
При более высоких температурах инициирование процесса горения осуществляется метиленовым радикалом  $\text{CH}_2$ :



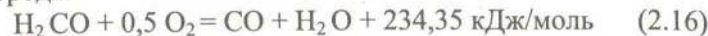
На второй стадии происходит разложение формальдегида. Суммарная реакция термического разложения



протекает через следующие промежуточные реакции:



Суммарная реакция разложения формальдегида в присутствии кислорода:



протекает также через ряд промежуточных реакций, которые изложены в работах Лаврова Н.В.

Реакции в метанокислородном пламени рассмотрены также в ряде работ, в том числе в работах Фристрома и Вестенберга [198], которые считают, что в пламени протекает ряд процессов: реакции с участием метана; образование  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и промежуточных продуктов; горение оксида углерода; цепные разветвленные процессы и рекомбинация радикалов.

Для описания кинетики высокотемпературного окисления метана всеобщее признание получил механизм, представляющий эту реакцию, как цепную с вырожденным разветвлением [199]. Основная цепь состоит в последовательном отрыве атомов водорода от молекулы метана по схеме

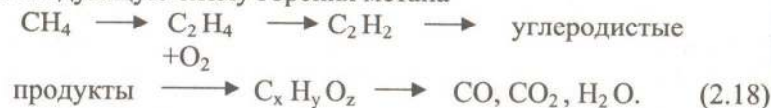


с последующим окислением до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Разветвление осуществляется через образование атомов  $\text{H}$ ,  $\text{O}$  и радикала  $\text{OH}$ .

При выборе конкретной схемы окисления  $\text{CH}_4$  необходимо учитывать условия протекания реакций. Разные исследователи по-своему составляют рабочие схемы окисления метана. Напри-

мер, в работе [200] составлена схема из 56 реакций, однако опущены реакции термического разложения метана и формальдегида и реакции образования более тяжелых углеводородов. Однако совершенно очевидно, что при высокотемпературном окислении метана в среде с недостатком окислителя и, особенно, для исследования процессов образования сажи в цилиндре газодизеля эти стадии необходимо включать. Несколько другой механизм горения метана в воздушной среде предложен в работе [201]. На основе предварительных оценок в расчетах использовались только те процессы, которые вносят в реакцию горения существенный вклад. В механизме фигурируют 18 частиц ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $NO_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CH_3$ ,  $CH_2$ ,  $H_2CO$ ,  $HCO$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $N$ ), участвующих в 70 реакциях. В некоторых работах [153] предполагается, что процесс горения метана зависит в свою очередь от закономерностей горения углерода, при которых возникает комплекс углерода с кислородом, который для процесса горения метана можно с некоторым приближением условно изобразить аналогично комплексам углерода твердого топлива.

С учетом изложенного выше, при рассмотрении феноменологии горения МВС в цилиндре газодизеля для характерных зон 3, 4, 5 зонной феноменологической модели возможно предположить следующую схему горения метана



Здесь в процессе горения возникают комплексы углерода, водорода и кислорода  $C_xH_yO_z$  и комплексы углерода и кислорода  $C_xO_z$ . При разрушении этих комплексов образуются  $CO$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$ .

## 2.2. Феноменология, химизм и феноменологическое моделирование сажеобразования в цилиндре газодизеля

### 2.2.1. Общие воззрения на процесс сажеобразования в цилиндре газодизеля

Несмотря на достаточное количество исследований в области образования сажи, проведенных до настоящего времени, имеется недостаточно информации о механизме этого процесса, регулировании его скорости, причем во многих случаях эта информация носит полуэмпирический характер, что ограничивает возможность ее применения вне систем, где были проведены эти исследования.

В исследованиях отечественных ученых, посвященных вопросам образования сажи в углеводородных пламенах и выполненных в последние десятилетия с использованием чувствительных методов диагностики, открыто немало новых подходов к механизму образования сажи в газофазных углеводородных пламенах, что позволяет получить хотя бы качественную картину. К таким исследованиям можно отнести работы Теснера П.А., Блоха А.Г., Модзалевской М.Л., Щелокова А.И. [227...240], Страдомского М.В., Васильева Е.П., Максимова Е.А., Малярова В.С., Таран Э.Н. [241...264], Гордиец Б.Ф., Шмоткина Л.А., Веселова С.Н., Бахира Л.П., Жданович О.Б., Кнорре В.Г., Каменщикова В.И., Бакирова Ф.Г., Баширова Н.Х., Головиной Е.С., Дубовицкого А.Я. [265...271], Алемасова В.Е., Дрегаллина А.Ф., Померанцева В.В., Кривандина В.А., Михеева В.П., Медникова Ю.П.

Образованию сажи в цилиндре дизеля посвящены работы Дьяченко Н.Х., Батурина С.А., Ложкина В.Н., Звонова В.А., Фурсы В.В., Петриченко Р.М., Сеницына В.А., Курочкина В.А., Лоскутова А.С., Макарова В.В. [272...285], Варшавского И.Л., Мачульского Ф.Ф., Гуреева А.А., Махова В.З., Разлейцева Н.Ф., Кратко А.П., Вихерта М.М. [286...290], Гладышева А.В., Вагнера В.А., Матиевского Д.Д., Смайлиса В.И., Баранова Н.А., Крутого В.И. [291...300].

Вопросам оптимизации и моделирования выгорания топлива в цилиндре дизеля также посвящены работы еще целого ряда зарубежных и отечественных исследователей [301...336].

Экспериментальные данные, полученные для различных систем горения и целого ряда различных видов топлива указывают на то, что химическая кинетика является преобразующим скоростным процессом, регулирующим выделение сажи из системы. Обнаружено, что даже в хорошо перемешанных системах происходит выделение сажи, если соотношение углерода к кислороду в смеси топлива с окислителем превышает 0,5, хотя с термодинамической точки зрения выделение сажи должно начаться при отношении  $C/O = 1$  в соответствии с условием  $m = 2y \dots$  [308]:



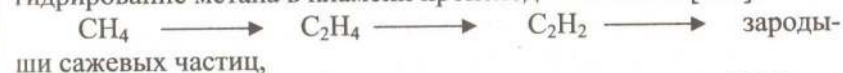
Наличие сажи в продуктах сгорания при  $C/O > 0,5$  объясняется тем, что некоторое количество кислорода связывается в относительно устойчивых продуктах сгорания  $CO_2$  и  $H_2O$  и не может реагировать с  $C_s$  в масштабе времени систем горения. Поскольку отношение  $C/O$  в некоторой области диффузионного пламени всегда будет превышать 0,5, то очевидно, что сажа в этой области будет выделяться всегда. Наличие сажи в конечных продуктах горения будет зависеть от скорости ее разрушения в области пламени с отношением  $C/O \leq 0,5$ . Механизм, посредством которого сажа может образовываться из парообразной фазы в пламени можно представить следующим образом [152, 308]:

исходные углеводороды  $\longrightarrow$  термический или окислительный пиролиз  $\longrightarrow$  образование зародышей конденсированных систем  $\longrightarrow$  рост поверхности  $\longrightarrow$  коагуляция  $\longrightarrow$  агрегация.

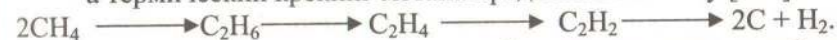
Частицы углерода представляют собой полимерные продукты с небольшим содержанием водорода. Исходя из природы частиц, обязательным условием сложных физико-химических процессов, предшествующих появлению углерода, являются реакции, связанные с удалением водорода и укрупнением углеродного скелета. Причем соотношение между атомами С и Н, структура сажи, термодинамические и теплофизические свойства механизма и химизм образования, размеры сажевых частиц, их количество зависят не только от температуры, но и от вида топлива, его химического состава, наличия окислителя, процессов смешения, временных параметров, промежуточных продуктов разложения.

В общем случае в цилиндре дизеля при образовании углерода должны участвовать [152, 227, 296, 297, 308, 330...332] диацетилен ( $C_4H_2$ ), метилацетилен, винулацетилен ( $C_4H_4$ ), полиацетилены с общей формулой ( $C_n H$ ,  $C_n H_2$ ,  $n = 4 \dots 10$ ) со следующей структурой связи между атомами  $H - C \equiv C - C \equiv C - H$ ;  $H - C \equiv C - C \equiv C - C \equiv C - C \equiv C - C \equiv C - H$  и т.д., атомный водород, ацетиленовые радикалы  $CH$ ;  $C_2$ ;  $\cdot C_2H$ ;  $\cdot C_4H_3$ , фенилацетилен, стирол, радикалы и обломки молекул ароматических и ненасыщенных ациклических соединений.

При сгорании МВС в цилиндре газодизеля в образовании углерода должны участвовать также углеводородные составляющие пламени метана: ацетилен ( $C_2H_2$ ), этилен ( $C_2H_4$ ), этан ( $C_2H_6$ ), метилацетилен, а также водород. Поскольку этих соединений в пламени мало, то возможно предположить, что они быстро расходуются в реакциях образования зародышей сажевых частиц. Исследования представленные в работах [152, 161, 169] показали, что в пламени метана происходит разложение метана через промежуточные продукты ароматического ряда, которые образуются путем полимеризации свободных радикалов  $CH_3$ ,  $CH_2$ ,  $CH$ , а в работе [56] приводятся данные, что сажевые частицы из пламени метана состоят из полициклических соединений – пирена, бензапирена, антрацена и т.д. Необходимо также учитывать, что дегидрирование метана в пламени происходит по схеме [152]:



а термический крекинг метана предполагает схему [152]:



Также возможно предположить образование атомов свободного углерода вследствие бимолекулярных химических реакций между радикалами  $CH_3$ ,  $CH_2$  и  $CH$ .

В работе [228] приводятся данные о том, что в метанокислородном пламени первой ступенью образования сажи являлось образование  $C_2H_2$ , а бензол, полициклические ароматические углеводороды и полиацетилены появляются после достижения максимальной концентрации ацетилена. Все это говорит о сложности физико-химических процессов, происходящих при горении МВС в цилиндре газодизеля и приводящих к образованию сажи.

При рассмотрении процесса образования сажи в цилиндре га-

зодизеля необходимо обратить внимание на химический состав топлива, образующего МВС. Именно он определяет во многом структуру, размеры и концентрацию сажи в ОГ газодизеля. Необходимо принять во внимание, что молекула жидкого углеводородного топлива будет иметь условную формулу ( $C_{14}H_{30}$ ) с соотношением Н/С около 2, а молекула метана  $CH_4$  имеет отношение Н/С – 4. На основе приведенных данных, выполненных разными школами, попытаемся представить структуру сажи, образующейся в цилиндре газодизеля.

Сажа не аморфное тело, так как сажевая частица имеет определенную и достаточно совершенную структуру, характеризующуюся взаимной упорядоченностью углеродных слоев из которых состоят первичные сажевые частицы (кристаллиты), но она и не является кристаллическим веществом, поскольку структура не имеет идеального порядка. Сажевая частица предположительно состоит из отдельных пространственно разделенных кристаллитов (зародышей сажи), связанных между собой микрофибриллами. Наиболее вероятный размер микрофибрилл, выходящих из сажевых кристаллитов составляет 1,0 нм. Они состоят в основном из цепочек полииновой и кумуленовой структуры. Каждая сажевая частица состоит из большого числа ( $10^3$ ) кристаллитов и содержит приблизительно  $10^5$  атомов углерода при условной формуле сажи  $C_{10}H$  и отношением Н/С около 0,1, а при условной формуле  $C_6H_2$  или  $C_8H_2$  с отношением Н/С около 0,2...0,3.

В работе [152] приводятся данные о составе сажевых частиц, соответствующих формуле сажи  $(C_8H_6)_x$ , а при возросшей температуре -  $(C_8H_4)_x$  и делается вывод о влиянии на состав сажи условий отбора. Размер сажевой частицы в цилиндре газодизеля составляет 10...30 нм. Кристаллит содержит 120...200 атомов углерода, которые объединены в 3...5 пластинок и имеет высоту 1,34...1,59 нм и длину 2,1 нм. Кристаллиты имеют форму близкую к прямоугольной и четкие границы. Пластинка состоит из 44 атомов углерода, расположенных в двух слоях со средним шагом 0,355 нм, чуть больше, чем у графита. Слой представляет собой гексагональную гранецентрическую цепочку. Два близко расположенных кристаллита, связанные с торца третьего, не лежащего на одной прямой, образуют элементарное звено. Связывание длинными микрофибриллами кристаллитов, входящих в состав

звеньев приводит к образованию гексагональной сетки, которая характеризуется множеством пустот и разрывов. Гексагоны сильно вытянуты в направлении оси  $x$ . Кристаллиты, помимо продольных, соединены и поперечными связями, которые возникают на более поздних стадиях. Сшивка кристаллитов происходит по линии их наибольшей плотности. Кристаллиты группируются в пары, располагаясь примерно на одной прямой, параллельной горизонтали. Наибольшее вероятное расстояние между кристаллитами 2,6 нм, наименьшее – 2 нм.

Таким образом, сажевые частицы являются составными, а первичными частицами являются кристаллиты. Сажевые частицы имеют не один, а несколько центров роста, что отражает коагуляцию частиц на ранней стадии их образования. Связывание кристаллитов продольными и поперечными связями приводит к образованию скелета сферических сажевых частиц и макроструктур. Рост графитовой сетки ограничивается встречей растущих навстречу друг другу кристаллитов. Поэтому средний размер кристаллита определяется соотношением скоростей образования и их прорастания. Образование кристаллитов и их прорастание происходит за счет молекул газовой фазы, однако, точный механизм этих процессов неизвестен. Существование критического расстояния между кристаллитами менее 2,0 нм указывает на то, что между ними действуют кулоновские силы отталкивания. Кристаллиты в пламени заряжены положительно и их заряд составляет 1..2 элементарных заряда. Предположительно кристаллиты образуются на положительных ионах за время, не превышающее среднее время рекомбинации ионов в пламени, т.е. 1 мс. Кристаллиты образуются путем укладки пластинок в направлениях  $a$  и  $c$ , а также в результате циклизации цепей линейно полимеризованного углерода непосредственно на поверхности растущего кристаллита. При больших значениях времени пребывания сажевые частицы могут агломерироваться, образуя разветвленные или неразветвленные цепи.

В цилиндре газодизеля сажевая частица принимает форму более или менее сферических агрегатов, состоящих из отдельных сферических частиц, что связано, в первую очередь, с быстрым начальным ростом и коагуляцией из-за повышенных температур

и давлений, а также скоростей смешивания и, в первую очередь, малого времени пребывания в цилиндре газодизеля (8...16 мс). Данные, приведенные в различных исследованиях, говорят о том, что время образования сажи зависит от температуры. В диапазоне температур 800...1800К время образования не превышает 1 мс, а при взрывах в закрытых сосудах заканчивается менее чем за  $10^{-7}$  с. Для дизелей повышение температуры увеличивает скорость образования зародышей сажи. При увеличении давления в цилиндре скорость образования зародышей становится чувствительной к структуре топлива [308]. Отношение атомов Н/С в исходном углеводородном топливе является важным параметром в оценке сажеобразования в пламени. Большое значение имеет также структура молекул. Чем больше разветвлены цепи, тем выше способность к образованию сажи. Ненасыщенность углеводородов увеличивает тенденцию к образованию сажи. Способность к сажеобразованию в зависимости от класса соединений определяет первичный процесс превращения более насыщенного водородом соединения в менее насыщенное. К снижению сажеобразования в пламенах приводит уменьшение концентрации атомов водорода. Другими словами, снижение сажеобразования может быть достигнуто реакциями потребляющими водород. Также установлено, что увеличение ароматических соединений увеличивает образование углерода в пламени.

Склонность различных топлив к сажеобразованию, характеризуемая величиной отношения  $\frac{a}{h_k}$  (где  $a$  – постоянный коэффициент,  $h_k$  – высота некоптящего пламени), представлено на рисунке 2.3 [192]. Из кривых, представленных на рис. 2.3 видно, что наиболее склонны к сажеобразованию топлива нафталинового ряда, несколько меньше – ароматические углеводороды, еще меньшее количество сажи образуют диолефины и дициклические нафтенны, затем следуют олефины и моноциклические нафтенны. Наименьшее сажеобразование дают углеводороды парафинового ряда (алканы), имеющие ациклическое строение. У них склонность к сажеобразованию возрастает с увеличением числа углеродных атомов в молекуле, в то время как у всех других углеводородов зависимость прямо противоположная – с увеличением

числа атомов склонность к сажеобразованию уменьшается. Чем слабее в углеводородной молекуле связь С - Н по сравнению со связью С - С, тем выше вероятность образования сажи. Ненасыщенность углеводородов увеличивает тенденцию к сажеобразованию, особенно велика она у ацетиленов.

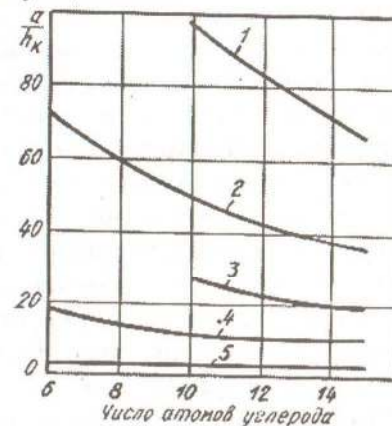


Рис. 2.3. Склонность различных углеводородов к сажеобразованию: ряд нафталина; 2 – бензольный ряд; 3 – диолефины и дициклические нафтенны; 4 – олефины и моноциклические нафтенны; 5 – алканы

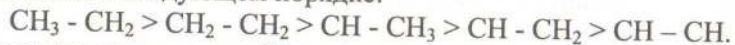
Применение метана  $\text{CH}_4$  (представителя парафинового ряда) в качестве большей части топлива при сгорании в цилиндре газодизеля позволяет априори делать вывод о существенном снижении сажесодержания в ОГ газодизеля, хотя крайне сложной представляется феноменология и химизм результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля. В первую очередь это возникает из-за различных схем протекания процессов их механизмов и возможного взаимного переплетения, поскольку в зависимости от режимов работы газодизеля количество и соотношение двух топлив меняется в широких пределах.

### 2.2.2. Феноменология и химизм результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля

На основе анализа исследований, проведенных в разные годы [151, 152, 154, 155, 192, 193, 198] можно сделать выводы о том,

что основной причиной сажевыделения при турбулентном диффузионном сгорании МВС в цилиндре газодизеля является существование локальных физических и химических условий для протекания пиролитических процессов, которым подвергаются исходные углеводороды топлива. Необходимым условием для образования сажи в цилиндре газодизеля является наличие высокотемпературных локальных зон с отсутствием или недостатком кислорода. Именно в таких зонах перед началом образования сажи происходит разложение и перегруппировка атомов молекулы топлива, в результате чего образуются углеводороды с менее высокой насыщенностью и более низким молекулярным весом. Скорости реакций разложения углеводородов или превышают скорости реакций окисления или имеют один и тот же порядок, что позволяет сделать вывод, что процессы термического разложения и превращения исходных продуктов могут протекать в зонах пламени незначительной толщины и за очень короткое время. По данным работы [191] нормальная скорость горения исследованных смесей природного газа с воздухом составила около 0,2 м/с и время пребывания исходных продуктов в зоне шириной 1 мм составила 5 мс. А по данным работы [198] возрастание температуры от 500 до 1700°С в сферическом пламени метанокислородной смеси в исследованных условиях происходило за 2,6 мс. На начальных стадиях термического разложения обычно рвутся химические связи с наименьшей энергией разрыва. Для метана энергия разрыва  $\text{CH}_3\text{-H}$  составляет 431,2 кДж/моль [155], этана  $\text{CH}_3\text{-CH}_3$  – 360 кДж/моль.

Энергия разрыва  $\text{C-C}$  связи в парафиновых углеводородах уменьшается в следующем порядке:



Энергия разрыва связей в молекулах ароматических углеводородов следующая:



При термическом разложении необходимо учитывать, что в общем случае могут протекать не только реакции распада, но и многочисленные сопутствующие и вторичные реакции. Возможность протекания таких реакций может быть оценена с термодинамической точки зрения по изменению энергии Гиббса –  $\Delta G$ . Энергия  $\Delta G$  метана равна нулю при  $T = 825\text{K}$ , что означает устойчи-

вость его относительно составляющих элементов ниже 825K и неустойчивость выше 825K. Образование бензола и нафталина из элементов термодинамически невозможно при любой температуре. Парафины выше этана при высоких температурах нестабильны и будут разлагаться. Ацетилен неустойчив относительно составляющих его элементов, однако существует при низкой температуре. Бензол также термодинамически неустойчив относительно составляющих его элементов, но в отличие от ацетилена эта устойчивость уменьшается при повышении температуры.

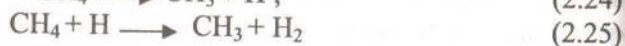
Как правило пиролиз углеводородов осуществляется по радикально-цепному механизму. Считается, что первичной реакцией является образование свободных радикалов в результате разрыва связи  $\text{C-C}$ , например метиленового или метильного. Простейшие радикалы  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5$ ,  $\text{H}$  реагируют с молекулой исходного углеводорода, чем и поддерживается цепной механизм. Процессы термического разложения (деструкция) протекают во времени, поэтому зачастую нельзя строго разделить продукты разложения исходных углеводородов топлива и продукты дальнейших химических превращений в пламени. Распределение концентраций газообразных компонентов в цилиндре газодизеля обусловлено не только протеканием химических процессов, но процессами диффузии.

Образование водорода, ацетилена, этилена и этана в качестве продуктов разложения метана в пламени хорошо согласуется с данными по термическому разложению метана, который идет через образование промежуточных ароматических и полициклических соединений, которые образуются путем полимеризации свободных радикалов  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}$  по цепному (Райс, 1935 г.) и молекулярному (Кассель, 1932 г.) механизмам.

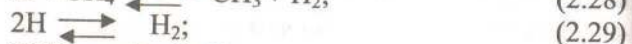
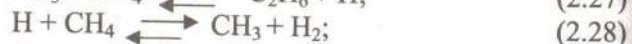
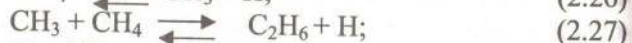
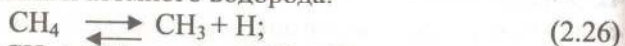
Молекулярный механизм предусматривает в начальной стадии отщепление метиленового радикала [152]:



В работе [152] высказывается мнение, что первичным продуктом разложения может являться метильный радикал:

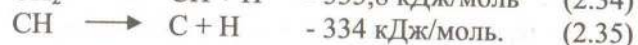
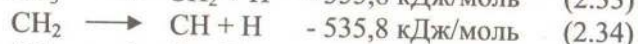
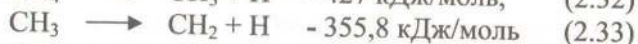
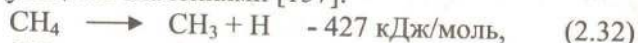


Цепной механизм превращения метана протекает с участием метильного радикала и атомного водорода:



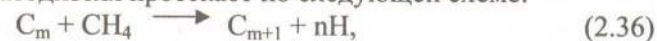
Отношение вычисленных скоростей цепного и молекулярного механизмов превращения метана равна единице при 1960К, однако экспериментальные данные показывают, что молекулярный механизм преобладает уже при температуре выше 1400...1500К [155].

Скорость термического распада молекулы  $\text{CH}_4$  и ее радикалов определяется, как отмечалось выше, энергией разрыва связи  $\text{C} - \text{H}$ . В рассматриваемых условиях процесс термического приролиза молекулы  $\text{CH}_4$  можно рассматривать как процесс дегидрогенизации молекулы и ее радикалов посредством последовательного отрыва от них атомов водорода. Отщепление атома водорода от молекулы  $\text{CH}_4$  и углеводородных радикалов  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}$  сопровождается появлением в газовом объеме радикала водорода  $\text{H}$ . Энергия разрыва связей  $\text{CH}$  для всех этапов будет определяться следующими значениями [157]:



При этом в зависимости от температурных условий могут протекать реакции гидрогенизации, т.е. присоединения водорода к углеводородным радикалам с образованием в итоге молекулы  $\text{CH}_4$ . Одновременно протекающие в объеме бимолекулярные химические реакции между радикалами  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}$  также приводят к образованию атомов свободного углерода. Вследствие высокой химической активности радикалов бимолекулярные реакции между радикалами могут протекать также при низких значениях энергии активации.

Образующийся атомарный углерод представляет собой ядра-зародыши сажевых частиц, на которых вследствие их полимеризации образуются многоатомные углеродные комплексы, т.е. сажевые частицы, размеры и масса которых определяется числом содержащихся в них атомов углерода. Комплексы образуются при столкновении свободных атомов углерода  $\text{C}$  или углеродных комплексов  $\text{C}_m$  с молекулами  $\text{CH}_4$ , радикалами  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}$ , а также с другими атомами углерода и многоуглеродными комплексами. Вместе с тем рост многоуглеродных комплексов может происходить также при столкновении между собой комплексов, содержащих различное число атомов углерода. Взаимодействие свободных атомов углерода  $\text{C}$  и углеродных комплексов  $\text{C}_m$  с молекулами  $\text{CH}_4$  и углеводородными радикалами для зон генерации сажи в МВС газодизеля протекает по следующей схеме:



где:  $n = 1, 2, 3, 4$ .

Это приводит при наличии столкновений к образованию углеродных комплексов  $\text{C}_{m+1}$ , состоящих из  $m+1$  атомов углерода. Взаимодействие свободных атомов углерода между собой, а также с многоуглеродными комплексами, как и взаимодействие комплексов между собой протекает по схеме:



Это приводит при каждом столкновении к образованию более крупных углеродных комплексов, состоящих из  $m+p$  атомов углерода.

На базе основных кинетических представлений о механизме термического превращения метана для характерных зон МВС в цилиндре газодизеля [157] можно составить вероятностную схему сажеобразования (рис. 2.4). Согласно схеме за промежуток времени  $\tau_{(1-1)}^1$  в систему добавляется по одному свободному атому углерода  $\text{C}$ , образующегося по соответствующей цепочке. Это предусматривает, что указанному промежутку времени  $\tau_{(1-1)}^1$  должна предшествовать цепочка процессов образования одного радикала  $\text{CH}$  из радикала  $\text{CH}_2$ , одного радикала  $\text{CH}_2$  из радикала  $\text{CH}_3$  и, наконец одного радикала  $\text{CH}_3$  из молекулы  $\text{CH}_4$ . В газовом объеме протекает очевидно несколько цепочек дегидрогенизации (ветви В, С, D), которые инициируются промежуточными углеводородными радикалами. Начало вторичных цепей В, С, D и т.д.



сдвинуты во времени относительно начала дегидрогенизации в главной цепи. Вполне вероятно, что индукционные периоды вторичных цепей могут иметь различную продолжительность, зависящую от условий формирования этой ветви. Это создает предпосылки формирования полидисперсного состава сажевых частиц. В течение индукционного периода отдельных ветвей процесса ядра-зародыши образуются непрерывно, и рост их начинается непосредственно с момента образования каждого ядра. Из этого следует, что для каждого ядра-зародыша процесс роста начинается в различные моменты времени, даже на главной цепи А. Поэтому к концу индукционного периода цепи А различные ядра-зародыши примут различные размеры в зависимости от времени пребывания. Таким образом, к концу индукционного периода формируется вполне определенный спектр размеров углеводородных комплексов. По окончании индукционного периода ядра-зародыши уже не образуются, а происходит укрупнение образовавшихся к концу индукционного периода углеродных комплексов различных размеров.

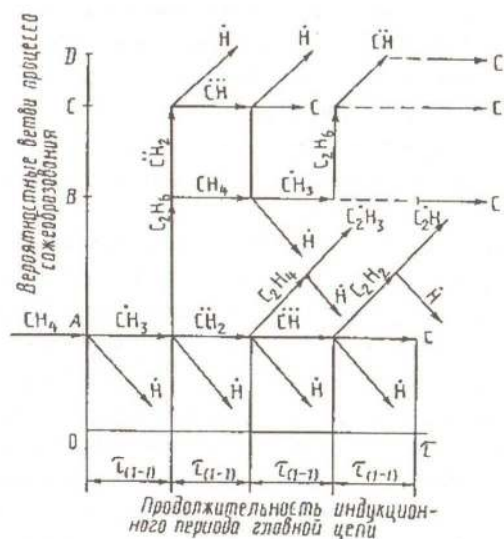


Рис. 2.4. Вероятностная схема сажеобразования в характерных зонах горения МВС в цилиндре газодизеля

Общую расширенную схему процесса результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля с учетом схем, предложенных Хоманном и Вагнером (1967 г.), Штеллингом, Фрейзи и Андерсоном (1957 г.), Гордоном, Смитом и Макнесби (1959 г.), Криттенденом и Лонгом (1973 г.), а также предложенную в работах [284, 297, 308] можно представить в виде определенной последовательности этапов и ветвей образования промежуточных и конечных элементов так, как это видно на рис. 2.5. С учетом общего углеводородного состава топлива, включающего жидкое и газообразное, на первой стадии сажеобразования каждая группа углеводородов будет подвергаться термическому или окислительному пиролизу, проходящих для разных углеводородов по разным цепям, с образованием значительного числа промежуточных продуктов, которые в свою очередь способны образовывать новые соединения. В любом случае у углеводородов топлива должны произойти разложение и перегруппировка атомов молекулы топлива. В работах [227, 228, 308] подчеркивается, что для целого ряда ациклических и ароматических видов топлива преобладающим продуктом высокотемпературного и окислительного пиролиза является ацетилен. Кроме твердого углерода, это самый высоко насыщенный углеводород с самой низкой молекулярной массой, являющийся последним устойчивым типом углеводорода, образующимся перед обнаружением сажевых частиц. В связи с тем, что термический пиролиз осуществляется посредством свободно-радикального механизма, можно ожидать, что даже малые концентрации  $O$ ,  $O_2$  и  $OH$  будут значительно ускорять процесс обеспечения дополнительного пути для образования радикалов посредством разветвленных реакций. В работе [308] приводятся данные о влиянии окислительного пиролиза на системы горения бензола. Добавка 10% кислорода увеличивала скорость разложения на порядок. В этой же работе показывается, что бензол, как типичный ароматический углеводород в системе горения в условиях окислительного пиролиза, подвергается действию атомарного кислорода, в результате чего образуется фенол с последующим его разложением. Главными продуктами разложения бензола являются водород, ацетилен, диацетилен и дифенил. Причем дифенил преобладает при температурах более низких.

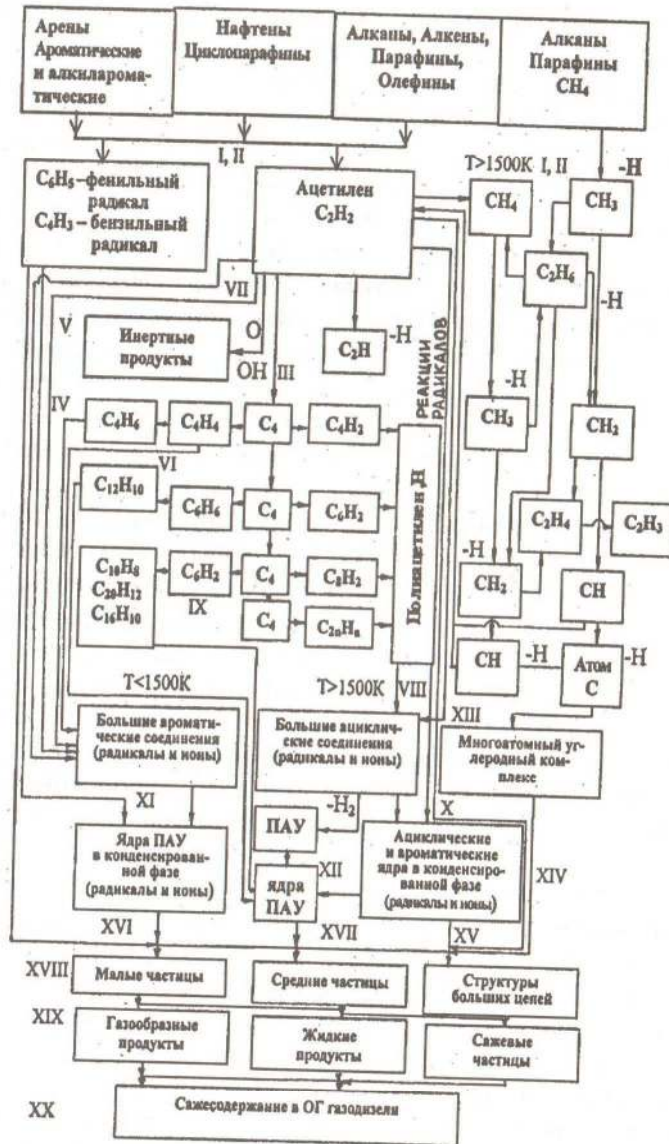


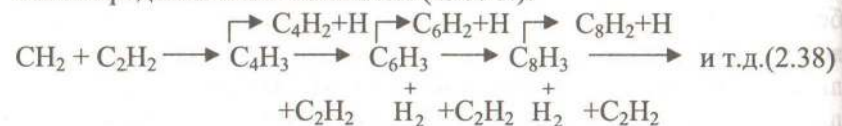
Рис. 2.5. Расширенная схема процесса результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля: I – термический пиролиз; II – окислительный пиролиз; III – процесс полимеризации ацетилена; IV –

диеновый синтез (соединение ацетилена с  $C_4H_6$ ); V – присоединение к фенильному радикалу  $C_6H_5$  ацетилена; VI – присоединение к фенильному радикалу  $C_6H_5$  винилацетилена  $C_4H_4$ ; VII – окисление ацетилена  $C_2H_2$  гидроксилом OH и H до инертных продуктов; VIII – присоединение к ациклическим соединениям, полиацетиленам и их радикалам, углеводородам, имеющим радикальный характер ацетилена и полиацетиленов с образованием больших ациклических соединений (молекул); IX – образование полициклических ароматических углеводородов из реакционно способных промежуточных соединений, частично циклических и богатых водородом (фенилацетилен  $C_6H_2$  и винилбензол  $C_8H_8$  образуют нафталин, пирен, бензапирен); X – образование ациклических и ароматических ядер в конденсированной фазе (радикалы и ионы); XI – образование ядер ПАУ соединений в конденсированной фазе в результате присоединения ацетилена и реакций с метильным радикалом; XII – образование ядер ПАУ из полициклических ароматических углеводородов в результате присоединения углеводородных радикалов; XIII – образование многоатомных углеродных комплексов из атомарного углерода в результате их взаимодействий между собой и углеродом; XIV – образование зародышей сажевых частиц; XV – присоединение ациклических и ароматических ядер в конденсированной фазе ациклическими видами углеводородов топлива (прямая ветвь); XVI – присоединение ядер ПАУ в конденсированной фазе промежуточными продуктами превращений ароматических углеводородов топлива (косвенная ветвь); XVII – укрупнение ядер ПАУ за счет уплотнения и присоединения ПАУ; XVIII – рост, коагуляция и агрегация сажевых частиц; XIX – окисление углерода; XX – сажесодержание в ОГ газодизеля

При высоких температурах преобладает ацетилен и его полимерные формы. Таким образом, следует ожидать разрушения бензольного кольца у ароматических и алкилароматических углеводородов, причем при различных температурах и наличии окислительных групп возможно образование, различных конечных для этого этапа, продуктов углеводородного распада. На основании экспериментальных исследований, приведенных в ряде работ можно предположить [152, 153, 155, 157, 308], что главными группами продуктов после термического и окислительного пиролиза углеводородов в цилиндре газодизеля, которые принимают участие в процессе образования сажи, являются следующие группы: 1) ацетилен  $C_2H_2$  и полиацетиленовые углеводороды с молекулярной массой от 20 до 146; 2) полициклические аромати-

ческие углеводороды с молекулярной массой от 78 до 300; 3) реакционноспособные полициклические углеводороды с боковыми цепями и содержащими больше водорода, чем ароматические с молекулярной массой от 150 до 550; 4) продукты дегидрогенизации метана ( $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$ ). Относительное количество этих групп различно, поскольку механизм образования углерода существенно меняется не только от исходных групп, но и от температурных условий и наличия окислительных групп, а также времени и скорости прогрева. В общем случае скорость образования углерода во многом зависит от количества подходящих углеводородных радикалов. Таким образом, углеводородные предшественники сажевых ядер должны быть достаточно устойчивы, чтобы сопротивляться диспропорционированию при высоких температурах в системе горения и достаточно активны с химической точки зрения, чтобы объяснить скорость с которой образуются сажевые частицы (время образования менее 1 мс).

Исследования углеводородных пламен показали, что ацетилен играет важную роль в химических процессах и приводит к образованию полиацетилена, относительно простых моноциклических соединений ароматического ряда с боковыми цепями, состоящими из двух атомов углерода и полициклических углеводородов ароматического ряда. Образование полиацетилена ( $\text{C}_n\text{H}_2$ ,  $n = 4 \dots 10$ ) имеет место в зонах, где концентрации гидроксильных радикалов  $\text{OH}$  и атомов водорода  $\text{H}$  относительно велики. Постулируется, что процесс полимеризации ацетилена является цепным процессом и может, например, протекать в последовательности предложенной Хоманном (1967 г.):

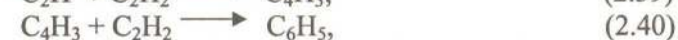
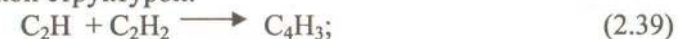


Эта цепь последовательных реакций у которой промежуточными продуктами являются полиацетилены:  $\text{C}_4\text{H}_2$  – диацетилен;  $\text{C}_6\text{H}_2$  – фенилацетилен;  $\text{C}_8\text{H}_2$ , а конечными – полиацетилен и водород.

По мере увеличения длины цепи действие радикалов в положениях, других, нежели концы цепей, становятся более вероят-

ными. Предполагается, что образованные таким образом углеводороды разветвленной цепи приводят посредством замыкания циклов к циклическим или полициклическим структурам. Это тяжелые углеводороды (молекулярный вес  $> 150$ ) имеют ярко выраженную радикальную природу. Они способны к дальнейшей быстрой реакции с полиацетиленами и друг с другом, и являются предшественниками сажи (цепь III на рис. 2.5).

Вместе с тем, возможно протекание чрезвычайно разнообразных реакций по разложению ацетилена в зависимости от различных факторов, например, образование свободных радикалов с ароматической структурой:



где:  $\text{C}_6\text{H}_5$  – фенильный радикал.

В реакциях могут участвовать  $\text{O}$ ,  $\text{H}$  и другие активные атомы и радикалы. В результате могут образоваться такие молекулы как винилацетилен –  $\text{C}_4\text{H}_4$ , дивинил –  $\text{C}_4\text{H}_6$  и т.д.

Молекулы дивинила могут подвергаться быстрым реакциям диенового синтеза с образованием ароматических структур [308]:



которые образуют в свою очередь большие ароматические соединения (молекулы), имеющие в основном радикальную и ионную природу (цепь IV на рис. 2.5).

При разложении ароматических и алкилароматических углеводородов топлива при термическом и окислительном пиролизе фенильные и бензильные радикалы образуются непосредственно из молекул топлива. Эти ароматические радикалы являются точками инициирования процесса образования сажевых зародышей. При низкой температуре и неокислительном пиролизе ароматических молекул топлива получаемый дифенил ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ ) разлагается с большими концентрациями фенильных радикалов. Ароматические углеводороды при низких температурах вообще склонны к образованию различных продуктов, а их углеводородные радикалы играют важную роль в образовании зародышей сажи, хотя в условиях сгорания МВС в цилиндре газодизеля возможно не самую главную. В работе [308] рассматривается предположение, что образование зародышей сажи начинается при добавке ацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) или винилацетилена  $\text{C}_4\text{H}_4$  к фенильному радикалу

$C_6H_5$  (цепи V и VI на рис. 2.5, соответственно). В результате образуется голоядерная структура – нафталин  $C_{10}H_8$ . Добавка двух молекул ацетилена может также привести к образованию нафталина посредством подобного механизма [152], но с возможным образованием в качестве побочных продуктов фенилацетилена  $C_6H_5$  и винилбензола (стирола)  $C_8H_8$ . Авторы считают, что большие полициклические ароматические соединения получают из нафталина посредством стабилизированного  $\pi$ -комплексом замещения метильного радикала с последующим отщеплением атома водорода и добавкой ацетилена для образования феналена. Повторение того же самого процесса приводит к образованию пирена ( $C_{16}H_{10}$ ).  $C_6H_5$  и  $C_8H_8$  обнаруживаются в пламени ацетилена. В итоге образуются большие ароматические соединения (молекулы), имеющие в основном ионную и радикальную природу.

Возвращаясь к ацетилену, полученному в результате термического или окислительного пиролиза необходимо отметить, что в присутствии значительного количества гидроксила OH и атомарного водорода некоторое количество  $C_2H_2$  будет окисляться до относительно инертных продуктов (цепь VII на рис. 2.5).

Возвращаясь к цепи III необходимо добавить, что образовавшиеся ациклические соединения, полиацетилены и их радикалы, разветвленные радикалы, углеводороды, имеющие радикальный характер, присоединяют полиацетилен и ацетилен и образуют большие ациклические соединения (молекулы), большая часть из которых имеет радикальную или ионную природу (цепь VIII на рис. 2.5). Кроме того, реакционноспособные промежуточные углеводороды, частично циклические, богатые водородом, могут образовывать полициклические ароматические углеводороды вследствие молекулярных перегруппировок или расщепления части своих молекул, в которых ароматическая структура уже предварительно образована (цепь IX на рис. 2.5). Фенилацетилен  $C_6H_5$  и винилбензол  $C_8H_8$  ряд авторов [152] считают "ключевыми" моноциклическими ароматическими структурами, на которых замыкается кольцо ступенчатых реакций синтеза при удлинении цепи ацетилена. Предполагается также, что может существовать равновесие между винилбензолом, фенилацетиленом и водородом. Дальнейший ступенчатый синтез с участием соединений  $C_6 - C_2$  приводит к образованию большо-

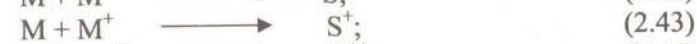
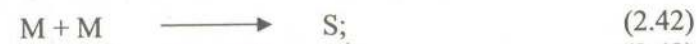
го разнообразия полициклических ароматических углеводородов.

Большие ациклические соединения (молекулы) могут расти посредством дальнейшего присоединения полиацетиленового радикала, дегидрогенизации и циклизации, образуя ациклические и ароматические ядра в конденсированной фазе с сохранением в значительной степени радикальной или ионной природы реагирующих веществ (цепь X на рис. 2.5).

Большие ароматические соединения (радикалы и ионы) реагируют с метильными радикалами и ацетиленом, образуя ядра полициклических ароматических соединений в конденсированной фазе также с сохранением в значительной степени радикальной или ионной природы (ветвь XI на рис. 2.5).

Поскольку ПАУ содержат в среднем больше углерода, чем полиацетилены, образованные из них радикалы присоединяются вместе с другими углеводородами к любому углеводородному радикалу, образуя ядра полициклических ароматических углеводородов (ветвь XII на рис. 2.5).

Образование многоатомного углеродного комплекса происходит по схеме изложенной выше, а на рис. 2.5 она представлена цепью XIII. Все последние взаимодействия углеводородов приводят к образованию зародышей сажевых частиц. В работе [308] предлагается ионный механизм образования зародышей сажевых частиц:



где: M - молекула тяжелого углеводорода,

S - заново образованное ядро.

Авторы считают, что вследствие электростатических эффектов реакции (2.43) и (2.44) соответственно быстрее и медленнее реакции (2.42). Следовательно предполагается, что если все тяжелые углеводороды были заряжены, то скорость образования сажи значительно уменьшилась. На снижение скорости образования сажи можно повлиять за счет повышения температуры и уменьшения эквивалентности  $M^+/M$  по направлению к единице. Образование зародышей сажевых частиц в целом на рис. 2.5 отмечено этапом XIV.

Ациклические виды углеводородов топлива способные к ре-

акциям с участием ациклических и ароматических ядер в конденсированной фазе, присоединяют ядра, прямо образуя ветвь механизма в результате чего размеры сажевых частиц увеличиваются (ветвь XV).

Ароматические углеводороды топлива, пиролизуясь посредством разрушения кольца, образуют ацетилены или, при более низких температурах, фенильные и бензильные радикалы, которые в свою очередь реагируют с ацетиленом  $C_2H_2$  или винилацетиленом  $C_4H_4$  и быстро присоединяют ядра ПАУ в конденсированной фазе, образуя косвенную ветвь механизма, которая также приводит к увеличению размера сажевых частиц (цепь XVI).

Ядра ПАУ в результате дальнейшей полимеризации, уплотнения и присоединения укрупняются до существенных размеров сажевых частиц (цепь XVII).

За время нахождения в цилиндре газодизеля образовавшиеся сажевые частицы, под воздействием различных факторов, подвергаются определенным изменениям. Рост сажевых частиц проявляется в увеличении массы сажевой частицы после ее образования посредством реакции с молекулами газовой фазы. Реагирующими углеводородами и, следовательно, основным строительным материалом главным образом являются полиацетилены, другие ациклические, ароматические, алкилароматические, полициклические ароматические углеводороды, углеводородные радикалы и соединения. Малые полиацетилены подвергаются преимущественно дальнейшей полимеризации, как было описано выше, а большие полиацетилены присоединяются к сажевым частицам быстрее. В результате отношение Н/С сажевых частиц (первоначально около 0,4 при диаметре частицы 1,5 нм) уменьшается. Это указывает на то, что присоединяемые полиацетилены, имеют очень высокий молекулярный вес или имеет место дегидрогенизация. В начальной стадии роста, из-за высокой скорости этих реакций, и радикальная, и ионная природа исходных частиц в основном сохраняются. Однако затем скорость роста более старых частиц резко снижается, что свидетельствует о потере сродства с полиацетиленом, т.е. утрате радикальной природы. По имеющимся данным и доля сажевых частиц, несущих заряд, уменьшается с 38% до 13% при увеличении среднего диаметра сажевых частиц с 5 нм до 10 нм. С одной стороны это связано с тем, что за

период роста возрастает температура в цилиндре газодизеля и термическая диссоциация начинает резко конкурировать с процессом полимеризации. Возможна дезактивация больших радикалов посредством отщепления атома водорода. Рост частиц практически заканчивается при достижении среднего диаметра сажевых частиц 10...30 нм. Сажевые частицы могут коалесцировать. Процесс, посредством которого сферические сажевые частицы коалесцируют, образуя большую сажевую частицу, относится к коагуляции. Она имеет место у относительно малых частиц, имеющих высокие скорости роста. Коагуляция, по существу, является физическим процессом. Для описания коагуляции частиц сажи в газодизеле принимаются допущения: результатом каждого столкновения двух частиц является коагуляция, и все частицы имеют сферическую форму. Распределение частиц по размерам в пламени изменяется от гауссова до логарифмически нормального в течение коагуляции. Это отклонение приписывается непрерывному добавлению частиц на малом конце посредством образования зародышей. Распределение принимает логарифмически нормальную форму, когда скорость образования зародышей становится гораздо меньше скорости коагуляции. Процесс коагуляции усложняется тем, что здесь рассматриваются полидисперсные системы, взаимодействующие посредством электронных и дисперсионных сил. Турбулентное смешивание пограничного слоя также значительно влияет на скорость коагуляции. В турбулентных окружающих зонах средняя величина завихрений гораздо больше диаметра коагулирующих частиц. При этом скорость коагуляции, испытывающей влияние сдвига, прямо пропорциональна числовой плотности частиц.

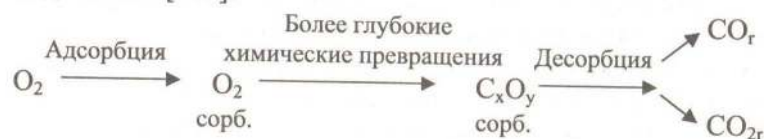
Когда скорость роста сажевых частиц замедляется, вследствие обеднения углеводородов газовой фазы или потери активности частиц, результатом продолжающейся коалесценции органических сажевых частиц является появление цепей сферических частиц. Этот процесс, отличный от коагуляции, называется агрегацией. Установлено, что 20% частиц в зоне агрегации, заряжены. В течение агрегации не происходит рост или образование сажевых частиц и скорость агрегации должна быть пропорциональна квадрату числовой плотности частицы, т.е. числовая плотность частицы при больших значениях времени обратно пропорцио-

нальна времени. Однако вполне возможно, что при высоких скоростях горения в газодизеле и малом количестве времени, процесс агрегации в результате которого образуются большие сажи-стые цепи, может быть несущественным.

Рост, коагуляция и агрегация сажевых частиц представлены на рис. 2.5 как этап XVIII. В тех зонах пламени, где присутствуют окисляющие группы, будет происходить окисление сажевых частиц, ядер и предшественников образования сажи. Поскольку углерод, образующийся в пламени, может быть газообразным, жидким или твердым, то и процесс окисления углерода может быть гомогенным (на молекулярном уровне в газовой фазе), полугетерогенным (окисление зародышей конденсированных систем, соизмеримых с крупными молекулами) и гетерогенным (окисление жидких и твердых продуктов) [152]. Гомогенный и полугетерогенный процессы окисления углерода до настоящего времени не исследованы. Горению твердого углерода посвящено большое количество работ.

Схематически взаимодействие твердого углерода с газами можно разбить на несколько последовательно протекающих этапов. На первом этапе происходит доставка окислителя из газовой среды к поверхности раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии. Второй этап заключается в физической или химической адсорбции молекул окислителя, сопровождающейся в ряде случаев объемным растворением. Третий этап предусматривает взаимодействие адсорбированного окислителя с поверхностными атомами углерода и образование продуктов реакции, также адсорбированных на графите. Четвертый и пятый этапы представляют собой десорбцию продуктов реакции и удаление (редиффузию) их в газовую фазу. Таким образом, процесс в целом включает в себя три вида процессов: диффузионные, адсорбционные и химические, причем последние два тесно переплетаются.

Сорбционный механизм можно приближенно представить в виде схемы [169]:



Атомы кислорода, находящиеся вблизи углеродной поверхности, адсорбируются на ней и удерживаются за счет химических сил. При этом происходит глубокое объединение атомов кислорода и углерода с образованием сложных гипотетических соединений типа  $C_xO_y$ . Эти соединения (комплексы) распадаются с выделением  $CO$  и  $CO_2$ . Этот процесс стадийный, однако, в зависимости от макро- и микроскопической структуры поверхности углерода и температурных условий относительная скорость и влияние этих стадий на процесс адсорбции сильно меняются. При высокотемпературном горении можно пренебречь нестационарностью реакций горения, поскольку сорбционные процессы протекают практически мгновенно и можно считать, что данному количеству прореагировавшего с углеродами окислителя отвечает стехиометрическое количество выделяющихся продуктов реакции. Скорость реакции  $W$  можно описать уравнением [169]:

$$W \approx \frac{k' C_{\text{по}}}{\Phi} = k C_{\text{по}}, \quad (2.45)$$

где:  $\Phi$  – опытная величина, зависящая от температуры процесса и структуры углеродной поверхности и имеющая размерность концентрации;

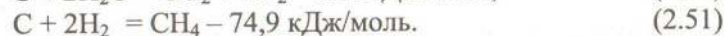
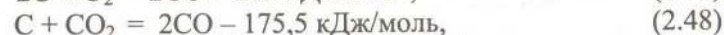
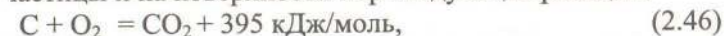
$k$  – опытная константа поверхностной реакции;

$k'$  – кажущаяся константа скорости поверхностной реакции, зависящая от температуры по закону Аррениуса;

$C_{\text{по}}$  – концентрация реагирующего у поверхности газа.

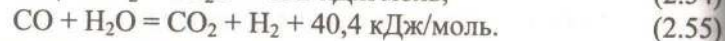
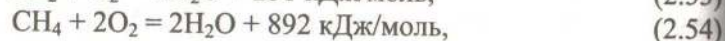
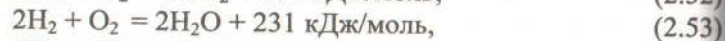
Механизм горения в этих условиях приобретает в силу быстротечности сорбционных процессов мгновенный характер.

Померанцев [169] предлагает при высокотемпературном горении углерода, считать основными на внешней поверхности сажевой частицы и на поверхности пор следующие реакции:



В условиях встречной диффузии продуктов неполного сгорания от поверхности углеродного массива в поток окислителя, диффундирующего навстречу им из окружающего частицу объе-

ма, неизбежно взаимодействие вблизи углеродной поверхности по реакциям:



Исходя из первого порядка реакций по компоненту, находящемуся в недостатке, можно принять упрощенное выражение для скорости реакций. Имеется обширный материал по определению кинетических констант реакций углерода с газами, однако он имеет существенные различия в данных даже для одного вида углеродного материала. Окисление на рис. 2.5 представлено, конечно очень условно, этапом XIX. Изучение вопросов, связанных с окислением углерода в цилиндре дизелей, является сложным и многогранным вопросом, переплетающимся, в первую очередь, с динамикой тепловыделения в цилиндре дизеля, имеющим далеко идущие последствия по возможному увеличению доли радиационного теплообмена в цилиндре, а при использовании природного газа возможны качественные изменения в этих закономерностях, с одной стороны, приводящие к увеличению доли окисляющегося углерода в цилиндре, а с другой существенно меняющие характеристики тепловыделения.

В любом случае результирующее сажеобразование в цилиндре газодизеля будет зависеть от количества сажи, образовавшейся и выгоревшей в процессе горения в цилиндре газодизеля.

### 2.2.3. Феноменологическая модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля

С учетом изложенного в предыдущих разделах второй главы, феноменологическую модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля можно представить в виде зональной модели, где зоны, в достаточной мере условные, делятся по отношению: к наличию окислителя, содержанию углеводородного топлива или метана, месторасположению в цилиндре и топливному факелу, уровню температуры и т.д.

Горение в цилиндре газодизеля происходит при изменяющихся условиях внутреннего теплообмена между различ-

ными зонами топливного факела, распространяющегося по МВС. Здесь турбулентные диффузионные потоки молекул метана, ДТ и кислорода, зачастую встречные и способные выравнять температуру и концентрации, ускоряют кинетические процессы окисления с различной глубиной превращений. Наличие мощных источников воспламенения позволяет снять ограничения для крупномасштабного механизма сгорания из-за развитости поверхности турбулентного горения. Увеличение масштаба турбулентных пульсаций интенсифицирует теплообмен в факеле и сокращает время сажеобразования.

С учетом феноменологии горения МВС в цилиндре газодизеля в диффузионном турбулентном нестационарном пламени одновременно протекают процессы окисления (горения) и термического разложения (пиролиза) метана, а также горения сложных углеводородов с образованием сажевых частиц и частичным их выгоранием. По характеру протекающих процессов и распределению компонентов горения в цилиндре газодизеля можно выделить следующие характерные зоны.

Первая зона (рис. 2.6) представляет собой ядро топливного факела, характеризуемое избытком углеводородного горючего и недостатком окислителя с температурным уровнем менее 1500К. Здесь происходит генерация сажевых частиц по низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ). На расширенной схеме процесса результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля (см. рис. 2.5) НТФМ включает этапы и цепи, расположенные слева. Для НТФМ преобладающими будут цепи образования фенильного радикала ( $\text{C}_6\text{H}_5$ ) и бензильного радикала ( $\text{C}_4\text{H}_3$ ) непосредственно из ароматических и алкилароматических углеводородов топлива в результате термического и окислительного пиролиза при низких температурах. В таких условиях получаемый по другой схеме дифенил ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ ) также разлагается с образованием большого количества фенильных радикалов. К образованию больших ароматических соединений приводят в таких условиях цепи, присоединяющие ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) или винилацетилен ( $\text{C}_4\text{H}_4$ ) к фенильному радикалу с образованием нафталина ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ ). По длине зоны 1 наибольшее количество сажевых зародышей будет по НТФМ образовываться ближе к носку распылителя форсунки. Именно там возможны наиболее низкие температуры и

наименьшее количество кислорода воздуха. По мере продвижения топливного факела, интенсификации процессов испарения и горения, увеличения температуры и  $\alpha$  увеличивается возможность развития других механизмов, тем более вероятных, чем ближе условная граница разделения ядра факела и оболочки факела. Вторая зона (зона 2 на рис. 2.6) представляет собой оболочку топливного факела, которая имеет те же характеристики, что и первая, но температурный уровень выше 1500К. Механизм образования сажи протекает здесь в основном по высокотемпературному ацетиленовому механизму (ВТАМ), по которому химическими зародышами являются полиацетилены.

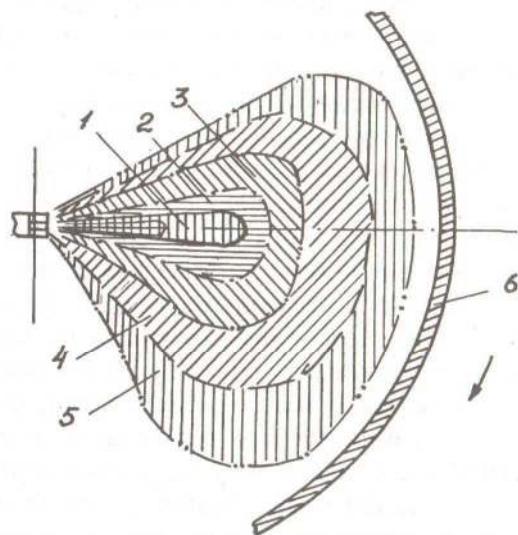


Рис. 2.6. Феноменологическая (зональная) модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля: 1 – зона образования сажи по НТФМ; 2 – зона образования сажи по ВТАМ; 3 – зона генерации сажи с недостатком окислителя в МВС; 4 – зона генерации сажи с избытком окислителя в МВС; 5 – зона догорания обедненной МВС; 6 – стенка цилиндра

Периферийная часть оболочки из-за присутствия метана может содержать атомы свободного углерода и его комплексов, полученных в результате реакций термического пиролиза метана

( $\text{CH}_4$ ) и его радикалов. В результате разложений углеводородов топлива в условиях повышенных температур возможно образование в качестве последней структуры-ацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ). В присутствии даже небольшого количества радикалов  $\text{OH}$  и  $\text{H}$  ацетилен полимеризуется, образуя в ходе цепных реакций целый ряд промежуточных продуктов – полиацетиленов, которые в дальнейшем приводят к циклическим или полициклическим структурам с молекулярным весом  $> 150$ .

Они способны к дальнейшей быстрой реакции с полиацетиленом и друг с другом и являются предшественниками сажи (цепи III и VIII на рис. 2.5). Для этой зоны является характерным образование больших ациклических соединений именно по ВТАМ. Для этих двух зон характерны все остальные цепи развития сажевых структур, изложенные выше, включая процессы образования: ядер ПАУ в конденсированной фазе (цепь XI), ядер ПАУ (цепь XII) ароматических и ациклических ядер в конденсированной фазе (цепь X); образования сажевых частиц (этап XIV) и т.д., включая этапы роста, коагуляции и агрегации сажевых частиц (этап XVIII). В локальных участках зон 1 и 2 (рис. 2.6) с местными локальными коэффициентами избытка воздуха  $\alpha > 0,7$  возможно частное выгорание образовавшихся сажевых частиц. Эти участки скорее всего характерны для периферии зон и связаны в первую очередь с наличием турбулентных вихрей, способных перемешивать и подводить кислород воздуха в зону возможного локального окисления сажевых частиц.

Третья зона (зона 3 на рис. 2.6) представляет собой зону генерации сажевых частиц в области цилиндра газодизеля с преимущественно МВС, где имеется недостаток окислителя и температурный уровень выше 1500К. В этой зоне также преобладают реакции термического и окислительного пиролиза молекулы  $\text{CH}_4$  и ее радикалов с последующим образованием на последней стадии процесса атомов свободного углерода и его комплексов. Одновременно образование в объеме атомов свободного углерода происходит вследствие бимолекулярных химических реакций между радикалами  $\dot{\text{C}}\text{H}_3$ ,  $\dot{\text{C}}\text{H}_2$ ,  $\dot{\text{C}}\text{H}$ . В зоне 3 с МВС атомарный углерод образуется путем дегидрогенизации  $\text{CH}_4$  и ее радикалов вследствие последовательного отрыва от них атомов водорода.



От молекулы  $\text{CH}_4$  последовательно отщепляются один атом водорода  $\dot{\text{H}}$  и углеводородные радикалы  $(\dot{\text{C}}\text{H}_3, \dot{\text{C}}\text{H}_2, \dot{\text{C}}\text{H})$  с появлением в газовом объеме радикала водорода. С другой стороны продукты дегидрогенизации – углеводородные радикалы и атомарный водород – в силу своей химической активности при определенных условиях могут образовывать и другое направление процесса – рекомбинацию метильных радикалов  $\dot{\text{C}}\text{H}_3$  в этан  $\text{C}_2\text{H}_6$  с вероятностью последующей дегидрогенизации молекулы этана с образованием свободного водорода и этильного радикала  $\text{C}_2\text{H}_5$  и дальнейшего развития цепного процесса. Кроме того, возможен обрыв цепи, поскольку метиленовые радикалы  $\dot{\text{C}}\text{H}_2$  рекомбинируют с образованием молекулы этилена  $\text{C}_2\text{H}_4$  с последующим ее термическим распадом. Радикал  $\dot{\text{C}}\text{H}$  может рекомбинировать с образованием молекулы ацетилена  $\text{C}_2\text{H}_2$  опять же с последующим распадом на  $\dot{\text{C}}_2\text{H}$  и  $\dot{\text{H}}$ . Наибольшая вероятность образования свободного углерода достигается в случае, когда от исходной молекулы  $\text{CH}_4$  отрываются в результате энергетического разрыва связей C-H все четыре атома водорода. Образовавшиеся атомы углерода являются ядрами-зародышами сажевых частиц (ветвь XIII на рис. 2.5).

Вероятностная схема образования сажи в характерной зоне 3 с недостатком окислителя, когда в газовом объеме протекает несколько цепочек дегидрогенизации, которые инициируются промежуточными углеводородными радикалами и начало дегидрогенизации сдвигается во времени для каждой цепи представлено на рисунке (см. рис. 2.4). От организации турбулентных потоков и интенсивности турбулентного обмена зависит длительность процесса дегидрогенизации метана в цилиндре газодизеля. Длительность этого интервала представляет собой время пребывания молекулы углеводорода в зоне термического разложения, т.е. время индукции тесно связано с протеканием турбулентного обмена в факеле. С другой стороны время индукции влияет на полидисперсность образующихся углеродных комплексов, поскольку образование спектра размеров углеродных комплексов происходит

именно в индукционный период. Чем более длительным является период индукции, тем выше степень полидисперсности образующихся углеродных комплексов. С уменьшением времени индукционного периода степень полидисперсности уменьшается. По окончании индукционного периода ядра-зародыши уже не образуются, а происходит только укрупнение образовавшихся углеродных комплексов различных размеров. После окончания индукционного периода величина концентрации сажевых частиц и определяется процессом массообмена в зоне факела.

Четвертая зона (зона 4 на рис. 2.6) отличается от третьей избытком окислителя. В этой зоне достигается наиболее высокая температура. В таких условиях преобладающими являются реакции окисления  $\text{CH}_4$ , определяющие тепловой режим в цилиндре газодизеля. Одновременно взаимодействие с кислородом атомов углерода и его комплексов приводит к их разрушению с образованием диоксида углерода.

При этом в зависимости от температурных условий и локального коэффициента избытка воздуха возможны реакции гидрогенизации с образованием в итоге молекулы  $\text{CH}_4$ . Вследствие высокой химической активности радикалов бимолекулярные реакции между радикалами могут протекать даже при низких значениях энергии активации. Равновесная концентрация устойчивых углеводородных комплексов и их размеры определяются двумя противоположными процессами: образованием и укреплением комплексов с одной стороны и уменьшением размеров комплексов – с другой. В итоге они и определяют размеры сажевых частиц (углеродных комплексов) и их равновесную концентрацию в газовом объеме.

Пятая зона (зона 5 на рис. 2.6) представляет собой зону догорания обедненной МВС (срыва бедного пламени), в которой завершаются все химические реакции и устанавливается равновесная концентрация продуктов полного горения.

Указанные зоны находятся во взаимодействии друг с другом, обеспечивающим устойчивость протекания процесса сгорания углеводородного топлива и метана. Это турбулентный теплообмен между зонами, перенос продуктов незавершенных реакций и кислорода, способствующий дегидрогенизации  $\text{CH}_4$ , частота, масштаб и скорость турбулентных пульсаций, определяющие время смешения для зон факела и время сажеобразования.

Учитывая, что заметный термический и окислительный пиролиз сложных углеводородов и метана наступает в локальных высокотемпературных и переобогащенных зонах в цилиндре газодизеля при их взаимодействии и коэффициенте избытка воздуха близком к нулю, можно предположить, что основными зонами образования сажевых частиц (углеродных комплексов) в цилиндре газодизеля будут первые три зоны, а в последних двух будет происходить их окисление. Именно в зонах 4 и 5 будет происходить преимущественное выгорание сажевых частиц, образовавшихся в цилиндре газодизеля и они будут характеризоваться наиболее высоким температурным режимом и избытком окислителя.

## 2.3. Математическое моделирование сажеобразования в цилиндре газодизеля

### 2.3.1. Определение расчетной критической температуры и кинетического уравнения дегидрогенизации метана в цилиндре газодизеля

Образовавшиеся в зоне 3 (см. рис. 2.6) атомы углерода являются ядрами-зародышами сажевых частиц, размеры которых определяются процессами присоединения к ним атомов углерода и разрушения соответствующих углеродных комплексов. Равновесная концентрация устойчивых углеродных комплексов и их размеры, таким образом, будут определяться двумя основными, но противоположно направленными процессами: образованием и укрупнением углеродных комплексов, с одной стороны, и гибелью и уменьшением размеров комплексов – с другой.

В равновесных условиях в газовом объеме при сгорании МВС в цилиндре газодизеля в условиях локального участка в зоне 3 всегда должны существовать углеродные комплексы -  $C_n$ , содержащие различное число  $n$  атомов углерода. Размер  $r_n$  комплекса  $C_n$  определяется числом  $n$  атомов углерода, образующих этот комплекс. Объем одного атома углерода представим как  $V_0$ . Тогда для одного комплекса  $C_n$  из  $n$  атомов углерода объем всего комплекса можно представить в виде:

$$V_n = V_0 \cdot n. \quad (2.56)$$

Обозначая через  $i_n$  - число комплексов  $C_n$ , имеющих объем  $V_n$  каждый, можно определить относительное содержание в газовом объеме углеродных комплексов различных размеров:

$$N(V_n) = \frac{i_n \cdot n}{\sum_{n=1}^{\infty} i_n \cdot n} \quad (2.57)$$

Выражение 2.57 определяет распределение углеродных комплексов по их объему в равновесных условиях. Суммарная масса образовавшихся углеродных комплексов определится по следующему выражению:

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} m_0 \cdot n \cdot i_n, \quad (2.58)$$

где:  $m_0$  - масса атома углерода.

В соответствии со схемой (см. гл. 2.2.2) процесс образования радикалов свободного углерода С происходит через стадии последовательного отщепления от исходной молекулы метана  $\text{CH}_4$  одного атома водорода Н. Равновесная концентрация радикалов углеводородов  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$  и атома водорода Н в газовом объеме определяется условиями динамического равновесия между процессами отщепления и присоединения атомов водорода к углеводородным радикалам.

Изменение в единицу времени числа атомов водорода  $n_H$  в углеводородных радикалах можно описать известным кинетическим уравнением:

$$\frac{dn_H}{d\tau} = \frac{n_H^-}{t^-} - \frac{n_H^+}{t^+}, \quad (2.59)$$

где:  $n_H^+$  - среднее число атомов водорода, покидающих углеводородный радикал за время  $t^+$ ;  $n_H^-$  - среднее число атомов водорода, присоединяющихся к углеводородному радикалу за время  $t^-$ .

Если принять во внимание, что отношение:

$$\tau^+ = \frac{t^+}{n_H^+}, \quad (2.60)$$

характеризует среднее время, за которое от углеводородного радикала отщепляется один атом водорода, а среднее время за которое к углеводородному радикалу присоединяется один атом водорода можно представить отношением:

$$\tau^- = \frac{t^-}{n_H^-}, \quad (2.61)$$

то равенство (2.59) можно представить в следующем виде:

$$\frac{dn_H}{d\tau} = \frac{1}{\tau^-} - \frac{1}{\tau^+}. \quad (2.62)$$

Величины  $\tau^-$  и  $\tau^+$  представляют собой не что иное, как соответственно, среднее время свободного пробега углеводородного радикала и среднее время пребывания атома водорода в соединении с углеводородным радикалом. Соотношение между этими величинами определяет условие протекания процесса дегидрогенизации углеводородов, связанного с гибелью и восстановлением рассматриваемых углеводородных радикалов. Чем выше величина среднего времени свободного пробега углеводородных радикалов  $\tau^-$ , тем меньше вероятность его столкновения с радикалами водорода и, таким образом, меньше вероятность его восстановления. Наоборот, чем меньше среднее время отщепления атома водорода  $\tau^+$  от углеводородного радикала, тем выше вероятность его гибели, т.е. вероятность образования свободного углерода. Отношение  $1/\tau^-$  - характеризует вероятность выживания, а отношение  $1/\tau^+$  - вероятность гибели углеводородных радикалов в единицу времени.

Условие детального динамического равновесия можно записать как условие:

$$\tau^- = \tau^+. \quad (2.63)$$

Здесь число атомов водорода, покидающих углеводородный радикал в единицу времени, становится равным числу атомов водорода, присоединяющихся к этому радикалу. В соответствии с кинетической теорией газов среднее время свободного пробега углеводородного радикала в атмосфере водорода определяется соотношением:

$$\tau^- = \frac{1}{pN_H \cdot 10^3 \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \cdot \frac{M_p + M_H}{M_p} \right)^{1/2} \cdot \pi (r_p + r_H)^2}, \quad (2.64)$$

где:  $p$  - коэффициент равный  $1,6 \cdot 10^{-2}$  [155, 157];  $N_H$  - объемная концентрация водорода;  $T$  - температура;  $M_p$  - масса углеводородного радикала;  $M_H$  - масса атома водорода;  $r_p$  - радиус молекулы углеводородного радикала;  $r_H$  - радиус атома водорода;  $k$  - постоянная Больцмана.

Среднее время пребывания атома водорода в углеводородном

радикале определяется по формуле:

$$\tau^+ = \tau_0 \exp \left[ \frac{E(n_H)}{kT} \right], \quad (2.65)$$

где:  $\tau_0$  - период собственного колебания атома водорода;  $E(n_H)$  - энергия связи атома водорода в углеводородном радикале.

Период собственных колебаний атома водорода в углеводородном радикале определяется по формуле:

$$\tau_0 = \frac{\Delta}{\left( \frac{kT}{2\pi M_H} \right)^{1/2}}, \quad (2.66)$$

где:  $\Delta$  - амплитуда колебаний атомов водорода.

В связи с тем, что атом водорода входит в радикал в связанном состоянии, что амплитуда его колебания определяется средним расстоянием между соседними молекулами и их числом в рассматриваемом объеме. В первом приближении можно принять, что величина  $\Delta$  обратно пропорциональна плотности упаковки молекул  $\Delta = \frac{1}{n}$ . С учетом (2.66) формулу (2.65) можно преобразовать:

$$\tau^+ = \frac{\Delta}{\left( \frac{kT}{2\pi M_H} \right)^{1/2}} \exp \left[ \frac{E(n_H)}{kT} \right]. \quad (2.67)$$

С учетом условия (2.63) и (2.65) можно определить вероятность поступления в объем в единицу времени свободных атомов водорода  $\left( \frac{1}{\tau^+} \right)$  и вероятность ухода этих атомов из объема  $\left( \frac{1}{\tau^-} \right)$ , вследствие присоединения к углеводородным радикалам в процессе столкновений. Скорость поступления в объем свободных атомов водорода  $W_H^+$  характеризуется величиной  $\left( \frac{1}{\tau^+} \right)$ , скорость их убыли  $W_H^-$  характеризуется величиной  $\left( \frac{1}{\tau^-} \right)$ .

На основании молекулярно-кинетической теории газов можно записать формулу для выражения скорости поступления атомов водорода в объем:

$$W_H^+ = \frac{1}{\Delta} \cdot \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[ -\frac{E(n_H)}{kT} \right], \quad (2.68)$$

а скорость убыли атомов водорода из объема:

$$W_H^- = N_H p \cdot \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \cdot \frac{M_p + M_H}{M_p} \right)^{1/2} \cdot \pi (r_p + r_H)^2. \quad (2.69)$$

Анализ формул (2.68) и (2.69) позволяет сделать вывод, что скорости  $W_H^-$  и  $W_H^+$  зависят от температуры  $T$ . Для выполнения равенства

$$W_H^- = W_H^+ \quad (2.70)$$

необходимо найти температуру  $T$ , равную  $T^*$ , при которой скорость поступления в объем свободных атомов водорода становится равной скорости их убывания из объема. Температура  $T^*$ , таким образом, будет являться критической температурой процесса дегидрогенизации углеводородов при окислении метана, поскольку именно при этой температуре будет выполняться равенство (2.70). На этом основании можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} N_H p \cdot \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \cdot \frac{M_p + M_H}{M_p} \right)^{1/2} \cdot \pi (r_p + r_H)^2 = \\ = \frac{1}{\Delta} \cdot \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[ -\frac{E(n_H)}{kT} \right]. \end{aligned} \quad (2.71)$$

В формулу (2.71) входит величина объемной суммарной концентрации атомов водорода  $N_H$ , формирующаяся соответственно в процессе отрыва одного, двух, трех и четырех атомов водорода от исходного углеводорода  $CH_4$ . Если обозначить через  $E(1)$  энергию активации процесса отрыва первого атома водорода, а через  $N_{1H}$  - соответственно объемную концентрацию свободных атомов водорода, то на основании (2.71) можно записать условия равновесия между радикалами  $CH_3$  и свободными атомами водо-

рода в следующем виде:

$$N_{1HP} \cdot \left( \frac{kT_1^*}{2\pi M_H} \cdot \frac{M_P + M_H}{M_P} \right)^{1/2} \cdot \pi(r_p + r_H)^2 = \\ = \frac{1}{\Delta} \cdot \left( \frac{kT}{2\pi M_H} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[ -\frac{E(1)}{kT_1^*} \right], \quad (2.72)$$

где  $T_1^*$  - критическая температура процесса дегидрогенизации для условий отрыва от молекулы  $\text{CH}_4$  первого атома водорода Н. При этой температуре устанавливается равновесие между количеством атомов водорода, приходящих в объем при разрыве связи С-Н в молекуле  $\text{CH}_4$  и количеством атомов водорода, покидающих этот объем в результате присоединения к радикалам  $\text{CH}_3$  в процессах столкновения с ними. Для условий отрыва  $n$  атомов водорода критическая температура процесса дегидрогенизации определяется выражением:

$$T^* = -\frac{1}{k} \cdot \frac{E(n_H)}{\ln \left[ p \left( \frac{M_P + M_H}{M_P} \right)^{1/2} \cdot \pi(r_p + r_H)^2 \right]}. \quad (2.73)$$

Вследствие неопределенности газокинетических размеров радикалов в расчетах их можно принять равным диаметру молекул. Тогда значение величины  $(M_H + M_P)/M_P$  может быть определено по первой стадии термического разложения метана. Энергия разрыва связи С-Н для рассматриваемых условий приведена в формулах (2.32), (2.33), (2.34) и (2.35). При этом критические температуры процесса дегидрогенизации для последовательных стадий составляют:

$$T_{\text{CH}_4}^* = 1162\text{K}; T_{\text{CH}_3}^* = 968\text{K}; T_{\text{CH}_2}^* = 1458\text{K}; T_{\text{CH}}^* = 911\text{K}.$$

Высокая температура  $T_{\text{CH}_2}^*$ , необходимая для продолжения реакции (2.34), по существу лимитирует возможность образования атомарного углерода в газовом объеме. Если реальная температура  $T < T_{\text{CH}_2}^*$ , происходит разрыв цепи и накопление в объеме

радикалов  $\text{CH}_2$ . Возможность дальнейшего развития процесса определяется, таким образом, необходимостью достижения в газовом объеме  $T > T_{\text{CH}_2}^*$ . Для определения, как изменяется соотношение между величинами скоростей поступления и убывания атомов водорода в объеме при отклонении температуры  $T$  от критической температуры процесса дегидрогенизации с учетом уравнений (2.68) и (2.69) можно записать следующее соотношение:

$$\frac{W_+}{W_+} \left( \frac{H}{T^*} \right) = \sqrt{\frac{T}{T^*}} \cdot \frac{\exp \left[ -\frac{E(n)}{kT} \right]}{\exp \left[ -\frac{E(n)}{kT^*} \right]} \quad (2.74)$$

и

$$\frac{W_-}{W_-} \left( \frac{H}{T^*} \right) = \sqrt{\frac{T}{T^*}}. \quad (2.75)$$

Обозначив  $\Delta T = T - T^*$ ,

$$(2.76)$$

получаем

$$\frac{W_+}{W_-} \left( \frac{H}{T^*} \right) = \exp \left[ \frac{E(n)}{kT} \cdot \frac{\Delta T}{T^*} \right]. \quad (2.77)$$

Как видно из выражения (2.77), величина  $\frac{W_+}{W_-} \left( \frac{H}{T^*} \right)$  зависит от двух параметров: соотношения  $\frac{E(n)}{kT}$  и величины соотношения  $\frac{\Delta T}{T^*}$ . Величина  $kT$  в выражении (2.77) характеризует среднюю кинетическую энергию поступательного движения свободных атомов водорода  $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2}kT$ . В рассматриваемых нами условиях термического разложения углеводородов путем разрыва связей С-Н, энергия связи атомов водорода в углеводородных радикалах и молекуле  $\text{CH}_4$  -  $E(n)$  превышает величину средней кинетической энергии поступательного движения атома водорода  $\bar{\epsilon}$ .

Поэтому

$$\frac{E(n)}{kT} > \frac{E(n)}{\bar{\epsilon}} > 1,0. \quad (2.78)$$

Следовательно, направление процесса (дегидрогенизация - гидрогенизация) целиком определяется знаком отношения  $\Delta T/T^*$ .

$$\text{При } \frac{\Delta T}{T^*} > 0, \text{ т.е. при } T > T^* \text{ отношение: } \frac{W_+(T)}{W_-(T)} > 1,0. \quad (2.79)$$

Из этого следует, что в условиях, когда температура газа  $T$  немного превышает критическую температуру  $T^*$ , процесс дегидрогенизации доминирует над процессом гидрогенизации, вследствие чего концентрация свободных атомов водорода увеличивается. В случае, когда  $T < T^*$ :

$$\frac{W_+(T)}{W_-(T)} < 1,0, \quad (2.80)$$

то процесс гидрогенизации преобладает над процессом дегидрогенизации, вследствие чего концентрация свободных атомов водорода уменьшается. Наиболее благоприятные условия образования свободного углерода достигаются на такой стадии процесса, когда от исходной молекулы углеводорода  $\text{C}_n\text{H}_n$  отрываются в результате энергетического разрыва связей С-Н все четыре атома водорода. Но чем меньше время, называемое временем индукции  $\tau_{\text{инд}}$  за которое происходит эта стадия, тем больше может образоваться свободного атомарного углерода.

### 2.3.2. Определение параметра сажеобразования и основных показателей углеродных комплексов при горении МВС в цилиндре газодизеля

Как было рассмотрено выше, критические температуры  $T_i^*$  процесса дегидрогенизации молекул метана и его радикалов, регулируют поступление в объем цилиндра свободных атомов водорода Н при сгорании МВС в цилиндре газодизеля. В результате разрыва связей С-Н в радикале СН (последняя стадия) в объем

цилиндра поступают свободные атомы углерода, являющиеся ядрами-зародышами сажевых частиц. Для выбранной схемы отрыва атомов водорода от молекулы метана  $\text{C}_n\text{H}_n$  развитие указанного процесса определяется вероятностями  $W_{(4-1)}$ ,  $W_{(3-1)}$ ,  $W_{(2-1)}$ ,  $W_{(1-1)}$ , последовательного разрыва связей С-Н. Концентрации образующихся таким образом свободных атомов водорода пропорциональны концентрациям исходных соединений  $N_{\text{C}_n\text{H}_n}$ ,  $N_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}$ ,  $N_{\text{C}_n\text{H}_{n-2}}$ ,  $N_{\text{C}_n\text{H}_{n-3}}$ .

Следовательно, можно записать для каждого этапа концентрацию свободных атомов водорода:

$$N_{H_{(4-1)}} = N_{\text{C}_n\text{H}_n} \cdot W_{(4-1)}^+ = \frac{N_{\text{C}_n\text{H}_n}}{\tau_0} \exp\left[-\frac{E_{(4-1)}}{kT}\right], \quad (2.81)$$

$$N_{H_{(3-1)}} = N_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}} \cdot W_{(3-1)}^+ = \frac{N_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}}{\tau_0} \exp\left[-\frac{E_{(3-1)}}{kT}\right], \quad (2.82)$$

$$N_{H_{(2-1)}} = \frac{N_{\text{C}_n\text{H}_{n-2}}}{\tau_0} \exp\left[-\frac{E_{(2-1)}}{kT}\right], \quad (2.83)$$

$$N_{H_{(1-1)}} = \frac{N_{\text{C}_n\text{H}_{n-3}}}{\tau_0} \exp\left[-\frac{E_{(1-1)}}{kT}\right], \quad (2.84)$$

где  $\tau_0$  - период собственных колебаний атома водорода в углеводородном радикале. Суммарная объемная концентрация поступивших в объем свободных атомов водорода будет равна:

$$N_H = \frac{1}{\tau_0} \sum_{n=1}^4 N_{\text{C}_n\text{H}_n} \exp\left[-\frac{E_{n-1}}{kT}\right]. \quad (2.85)$$

По отношению  $\frac{N_H}{N_{\text{C}_n\text{H}_n}}$  определяется доля молекул метана,

подвергшихся полной дегидрогенизации. Для расчета  $N_H$  необходимо определить равновесные концентрации в газовом объеме радикалов  $\text{C}_n\text{H}_{n-1}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_{n-2}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_{n-3}$ . Для этого запишем соответствующие кинетические уравнения:

$$\frac{d}{d\tau}(N_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}) = W_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}^+ - W_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}^- = \frac{1}{\tau_{(4-1)}} N_{\text{C}_n\text{H}_n} - \frac{1}{\tau_{(3-1)}} N_{\text{C}_n\text{H}_{n-1}}, \quad (2.86)$$

$$\frac{d}{d\tau}(N_{CH_2}) = W_{CH_2}^+ - W_{CH_2}^- = \frac{1}{\tau_{(3-1)}^+} N_{CH_3} - \frac{1}{\tau_{(2-1)}^-} N_{CH_2}, \quad (2.87)$$

$$\frac{d}{d\tau}(N_{CH}) = W_{CH}^+ - W_{CH}^- = \frac{1}{\tau_{(2-1)}^+} N_{CH_2} - \frac{1}{\tau_{(1-1)}^-} N_{CH}. \quad (2.88)$$

Кинетическое уравнение вида:

$$\frac{d}{d\tau}(N_C) = W_C^+ - W_C^- = \frac{1}{\tau_{(1-1)}^+} N_{CH} - \frac{1}{\tau_{(0-1)}^-} N_C \quad (2.89)$$

определяет равновесную концентрацию в газовом объеме свободных атомов углерода. А величина  $\tau_{(0-1)}^- = \tau_0^-$  представляет собой среднее время свободного пробега атомов углерода. Если принять, что вероятность появления в газовом объеме каждого последующего радикала не зависит от вероятностей появления предшествующих им радикалов, из уравнений (2.86), (2.87), (2.88) можно определить равновесные концентрации всех промежуточных радикалов и в конечном итоге атомов свободного углерода:

для радикалов  $CH_3$  при  $W_{CH_3}^+ = W_{CH_3}^-$ :

$$N_{CH_3} = N_{CH_4} \frac{\tau_{(3-1)}^-}{\tau_{(4-1)}^+}; \quad (2.90)$$

для радикалов  $CH_2$  при  $W_{CH_2}^+ = W_{CH_2}^-$ :

$$N_{CH_2} = N_{CH_3} \frac{\tau_{(2-1)}^-}{\tau_{(3-1)}^+} = N_{CH_4} \frac{\tau_{(3-1)}^- \tau_{(2-1)}^-}{\tau_{(4-1)}^+ \tau_{(3-1)}^+}; \quad (2.91)$$

для радикалов  $CH$  при  $W_{CH}^+ = W_{CH}^-$ :

$$N_{CH} = N_{CH_2} \frac{\tau_{(1-1)}^-}{\tau_{(2-1)}^+} = N_{CH_4} \frac{\tau_{(3-1)}^- \tau_{(2-1)}^- \tau_{(1-1)}^-}{\tau_{(4-1)}^+ \tau_{(3-1)}^+ \tau_{(2-1)}^+}; \quad (2.92)$$

для свободных атомов углерода при  $W_C^+ = W_C^-$ :

$$N_C = N_{CH} \frac{\tau_{(0-1)}^-}{\tau_{(1-1)}^+} = N_{CH_4} \frac{\tau_{(3-1)}^- \tau_{(2-1)}^- \tau_{(1-1)}^- \tau_{(0-1)}^-}{\tau_{(4-1)}^+ \tau_{(3-1)}^+ \tau_{(2-1)}^+ \tau_{(1-1)}^+}. \quad (2.93)$$

Полученное выражение (3.38) связывает объемную равновесную концентрацию  $N_C$  свободных атомов углерода с концентра-

цией молекул метана  $N_{CH_4}$  и соответствующими средними временами отрыва и средними временами свободного пробега углеводородных радикалов. В числителе здесь стоит произведение средних величин времени свободного пробега углеводородных радикалов и атомов углерода:

$$\tau_{(3-1)}^- = \tau_{CH_3}^-; \tau_{(2-1)}^- = \tau_{CH_2}^-; \tau_{(1-1)}^- = \tau_{CH}^-; \tau_{(0-1)}^- = \tau_C^-,$$

а в знаменателе стоит произведение средних величин времени отрыва атомов водорода от молекулы  $CH_4$  и промежуточных углеводородных радикалов:

$$\tau_{(4-1)}^+ = \tau_{CH_4}^+; \tau_{(3-1)}^+ = \tau_{CH_3}^+; \tau_{(2-1)}^+ = \tau_{CH_2}^+; \tau_{(1-1)}^+ = \tau_{CH}^+.$$

С учетом изложенного выражение (2.93) можно преобразовать в следующее выражение:

$$N_C = A \frac{\tau_C^-}{\tau_{CH_4}^+} N_{CH_4}, \quad (2.94)$$

где

$$A = \frac{\tau_{CH_3}^- \tau_{CH_2}^- \tau_{CH}^-}{\tau_{CH_3}^+ \tau_{CH_2}^+ \tau_{CH}^+}. \quad (2.95)$$

Как уже указывалось, величины  $\frac{1}{\tau_{CH_3}^-}$ ;  $\frac{1}{\tau_{CH_2}^-}$ ;  $\frac{1}{\tau_{CH}^-}$  представ-

ляют собой вероятности гибели соответствующих углеводородных радикалов в результате присоединения к ним атомов водорода. Их произведение

$$\frac{1}{\tau_*^-} = \frac{1}{\tau_{CH_3}^-} \cdot \frac{1}{\tau_{CH_2}^-} \cdot \frac{1}{\tau_{CH}^-} \quad (2.96)$$

характеризует при этом вероятность гибели углеводородных радикалов и предопределяет обрыв процесса сажеобразования.

Величины  $\frac{1}{\tau_{CH_3}^+}$ ;  $\frac{1}{\tau_{CH_2}^+}$ ;  $\frac{1}{\tau_{CH}^+}$  представляют собой вероятность

образования соответствующих углеводородных радикалов. Их произведение

$$\frac{1}{\tau_*^+} = \frac{1}{\tau_{CH_3}^+} \cdot \frac{1}{\tau_{CH_2}^+} \cdot \frac{1}{\tau_{CH}^+} \quad (2.97)$$

характеризует вероятность зарождения углеводородных радикалов и определяет развитие процесса сажеобразования в объеме МВС в цилиндре газодизеля, а параметр

$$A = \frac{1/\tau_*^+}{1/\tau_*^-} = \left( \frac{\tau^-}{\tau^+} \right)_{CH_3} \left( \frac{\tau^-}{\tau^+} \right)_{CH_2} \left( \frac{\tau^-}{\tau^+} \right)_{CH} \quad (2.98)$$

является параметром сажеобразования  $A$ . Он характеризует соотношение между вероятностями развития и обрыва процесса сажеобразования на его начальных стадиях. Чем выше величина  $A$ , тем более вероятным и интенсивным будет процесс сажеобразования, чем меньше величина  $A$ , тем менее эффективным будет этот процесс.

С точки зрения горения МВС в цилиндре газодизеля в характерной для генерации сажи зоне, интерес представляют неравновесные процессы, протекающие при условии, когда скорости зарождения и гибели свободного атомарного углерода не равны друг другу. Для таких условий величины  $\tau_{CH_4}^\pm$ ,  $\tau_{CH_3}^\pm$ ,  $\tau_{CH_2}^\pm$ ,  $\tau_{CH}^\pm$  и  $\tau_C^\pm$  можно рассматривать как соответствующие времена релаксации. Время релаксации  $\tau_C^-$  для свободного атомарного углерода характеризует то время, за которое находящиеся в равновесном состоянии атомы углерода переходят в другое равновесное состояние, но связанное. Время релаксации определяет время жизни свободных атомов углерода. Если время релаксации  $\tau_C^-$  для атомарного углерода будет велико по сравнению с временами релаксации промежуточных углеводородных радикалов, то процесс сажеобразования можно считать, как квазиравновесный. Это предполагает, что все промежуточные неравновесные углеводородные радикалы быстро приходят в равновесное состояние и неравновесность необходимо учитывать на стадии разрушения радикала  $CH$ , т.е. на стадии образования свободного атомарного углерода. Если время релаксации  $\tau_C^-$  мало, по сравнению с временами релаксации углеводородных радикалов, все промежуточные стадии процесса дегидрогенизации яв-

ляются неравновесными и для их описания необходимо учитывать соответствующие времена релаксации. Это означает, что при интегрировании приведенных выше кинетических уравнений необходимо учитывать, что  $W^+ \neq W^-$ .

На основании уравнений (2.86) для радикала  $CH_3$  можно записать:

$$\frac{d}{d\tau} (N_{CH_3}) = W_{CH_3}^+ - \frac{N_{CH_3}}{\tau_{CH_3}^-} \quad (2.99)$$

или

$$\frac{d \cdot \left( W_{CH_3}^+ - \frac{N_{CH_3}}{\tau_{CH_3}^-} \right)}{\left( W_{CH_3}^+ - \frac{N_{CH_3}}{\tau_{CH_3}^-} \right)} = - \frac{1}{\tau_{CH_3}^-} \cdot d\tau. \quad (2.100)$$

Выполнив интегрирование, получим для начального условия  $N_{CH_3} |_{\tau=0} = 0$ :

$$N_{CH_3} = W_{CH_3}^+ \cdot \tau_{CH_3}^- \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\tau}{\tau_{CH_3}^-} \right) \right]. \quad (2.101)$$

Данная зависимость определяет характер изменения во времени объемной концентрации углеводородного радикала  $CH_3$ . Как и предполагалось, в условиях, когда время релаксации  $\tau_{CH_3}^-$  мало, объемная концентрация радикалов  $CH_3$  стремится к своему равновесному значению  $N_{CH_3}^0$ :

$$N_{CH_3} = W_{CH_3}^+ \tau_{CH_3}^- = N_{CH_3}^0. \quad (2.102)$$

При определении концентрации радикалов  $CH_3$  скорость их образования  $W_{CH_3}^+$  была принята постоянной, поскольку число образующихся в единицу времени указанных углеводородных радикалов пропорционально неизменной во времени заданной кон-



центрации в объеме молекул метана  $N_{CH_4}$ . Теперь можно определить объемную концентрацию  $N_{CH_2}$  радикалов  $CH_2$ . Для радикала  $CH_2$  на основании уравнения (2.87) можно записать:

$$\frac{d}{d\tau}(N_{CH_2}) = W_{CH_2}^+ - \frac{N_{CH_2}}{\tau_{CH_2}^-} \quad (2.103)$$

и учитывая, что в рассматриваемых условиях:

$$W_{CH_2}^+ = \frac{N_{CH_3}}{\tau_{CH_3}^+} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{CH_2}^-}\right) \right], \quad (2.104)$$

поскольку скорость образования  $W_{CH_2}^+$  зависит в свою очередь от изменяющейся во времени концентрации  $N_{CH_3}$  радикалов  $CH_3$ , можно прийти к уравнению для определения концентрации радикала  $CH_2$ :

$$\frac{d}{d\tau}(N_{CH_2}) = \frac{N_{CH_3}^0}{\tau_{CH_3}^+} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{CH_3}^-}\right) \right] - \frac{N_{CH_2}}{\tau_{CH_2}^-}, \quad (2.105)$$

где:  $N_{CH_3}^0$  - равновесная концентрация радикалов  $CH_3$  в газовом объеме. Для рассматриваемых условий малого времени релаксации  $\tau_{CH_3}^- \ll \tau$  величина  $W_{CH_2}^+$ , как и следовало ожидать стремиться к своему равновесному значению:

$$W_{CH_2}^+ \left| \left( \frac{\tau}{\tau_{CH_3}^-} \right) \rightarrow \infty \right. = W_{CH_2}^0 = \frac{N_{CH_2}^0}{\tau_{CH_3}^-}. \quad (2.106)$$

Интегрируя выражение (2.105) можно определить объемную концентрацию в газовом объеме радикалов  $CH_2$ :

$$N_{CH_2} = N_{CH_3}^0 \frac{\tau_{CH_3}^-}{\tau_{CH_3}^+} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{(1-1)}^+}{\tau_{CH_3}^-}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{CH_2}^-}\right) \right]. \quad (2.107)$$

Аналогично найдем объемную концентрацию углеводородных радикалов  $CH$ :

$$N_{CH} = N_{CH_3}^0 \frac{\tau_{CH_2}^- \tau_{CH}^-}{\tau_{CH_3}^+ \tau_{CH_2}^+} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{(1-1)}^+}{\tau_{CH_3}^-}\right) \right] \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{(1-1)}^+}{\tau_{CH_2}^-}\right) \right] \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{CH}^-}\right) \right]. \quad (2.108)$$

Величина  $N_{CH_3}^0$  связана с исходной концентрацией молекул  $CH_4$  зависимостью:

$$N_{CH_3}^0 = N_{CH_4} \frac{\tau_{CH_3}^-}{\tau_{CH_4}^+}. \quad (2.109)$$

С учетом зависимости (2.109) и обозначив через

$$Z = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{(1-1)}^+}{\tau_{CH_3}^-}\right) \right] \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{(1-1)}^+}{\tau_{CH_2}^-}\right) \right] \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{CH}^-}\right) \right],$$

можно выражение (2.108) записать следующим образом:

$$N_{CH} = \frac{\tau_{CH}^-}{\tau_{CH_4}^+} A Z N_{CH_4}. \quad (2.110)$$

Равенство (2.110) определяет объемную концентрацию  $N_{CH}$

радикалов СН, непосредственно из которых переходят в газовый объем свободные атомы углерода в результате энергетического разрыва связи С-Н. Это равенство является исходным при расчетах концентрации в газовом объеме атомов свободного углерода  $N_C$ . Скорость образования свободных атомов углерода при этом будет определяться зависимостью:

$$W_C^+ = A Z \frac{N_{CH_4}}{\tau_{CH_4}^+}. \quad (2.111)$$

По принятой схеме термического превращения метана (см. рис. 2.4) за промежуток времени  $\tau_{(i-1)}^+$  в систему добавляется по одному свободному атому углерода, т.е. за промежуток времени  $\tau_{(i-1)}^+$  должна осуществиться вся цепочка процессов образования одного радикала СН из молекулы  $CH_4$ .

Взаимодействия свободных атомов углерода С и углеродных комплексов  $C_m$  с молекулами  $CH_4$  и углеводородными радикалами протекает по зависимости 2.36, а свободных атомов С между собой, углеродных комплексов между собой и с углеродом – по зависимости 2.37. Очевидно, что эти зависимости играют основную роль в процессе полимеризации атомарного углерода.

При рассмотрении вопроса о изменении массы  $M_m$  произвольного углеродного комплекса  $C_m$ , состоящего из  $m$  атомов углерода необходимо учитывать следующее. Изменение массы происходит в результате двух противоположно направленных процессов. При столкновении комплекса  $C_m$  с углеводородными ассоциациями  $CH_n$  процесс изменения массы протекает по схеме 2.36. При столкновении между углеродными комплексами  $C_p$  – по схеме 2.37. Первый процесс связан с увеличением массы комплекса вследствие присоединения к нему атомов углерода при столкновении комплекса с ассоциациями  $CH_n$  и другими углеродными комплексами, второй – с уменьшением массы комплекса  $C_m$ , которое происходит вследствие того, что часть атомов углерода, обладающих энергиями, превышающими энергию связи атомов С в комплексе  $C_m$ , может покинуть этот комплекс в результате теплового движения.

Следовательно, изменение массы  $M_m$  углеродного комплекса представляет собой непрерывный динамический процесс, определяющийся температурой системы и описывается уравнением вида:

$$\frac{dM_m}{d\tau} = U_m^+ - U_m^-, \quad (2.112)$$

где:  $U_m^+$  – скорость увеличения массы углеродного комплекса  $C_m$  вследствие присоединения к нему атомов углерода;  $U_m^-$  – скорость уменьшения массы комплекса в результате выхода из него атомов углерода. В соответствии с кинетической теорией газов величина  $U_m^+$  зависит от объемной концентрации  $N_{CH_n}$  ассоциаций  $CH_n$ , объемной концентрации  $N_{C_p}$  комплексов  $C_p$ , а также эффективных сечений столкновений  $\sigma_{CH_n}$ ,  $\sigma_{C_p}$  и средних относительных скоростей движения  $\bar{V}_{CH_n}$  и  $\bar{V}_{C_p}$ :

$$U_m^+ = \sum_{n=1}^4 N_{CH_n} \sigma_{CH_n} \bar{V}_{CH_n} + \sum_p N_{C_p} \sigma_{C_p} \bar{V}_{C_p}, \quad (2.113)$$

где:

$$\sigma_{CH_n} = \pi(r_{C_m} + r_{CH_n})^2; \quad (2.114)$$

$$\sigma_{C_p} = \pi(r_{C_m} + r_{C_p})^2. \quad (2.115)$$

Под относительными скоростями  $\bar{V}_{CH_n}$  и  $\bar{V}_{C_p}$  понимаются скорости теплового движения ассоциаций  $CH_n$  и комплексов  $C_p$  относительно комплекса  $C_m$ . Величины этих скоростей равны:

$$\bar{V}_{CH_n} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2kT}{\mu_{CH_n}} \right)^{1/2}, \quad (2.116)$$

$$\bar{V}_{C_p} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2kT}{\mu_{C_p}} \right)^{1/2}, \quad (2.117)$$

где:

$$\mu_{CH_n} = \frac{M_m M_{CH_n}}{M_m + M_{CH_n}}, \quad (2.118)$$

$$\mu_{C_p} = \frac{M_m M_{C_p}}{M_m + M_{C_p}}, \quad (2.119)$$

где:  $M_{CH_n}$  и  $M_{C_p}$  соответственно, массы углеводородных ассоциаций  $CH_n$  и углеродных комплексов  $C_p$ . Учитывая, что  $M_m \gg M_{CH_4}$ ,  $r_{C_m} \gg r_{CH_4}$ , выражение для скорости роста массы углеродного комплекса  $C_m$  в зависимости от температуры  $T$  можно записать в виде:

$$U_m^+ = 4\pi r_{C_m}^2 \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_{CH_4}}} \cdot N_{CH_n}. \quad (2.120)$$

В то же время  $U_m^-$  зависит от температуры и в соответствии с кинетической теорией жидкости является мерой скорости испарения атомов углерода с поверхности  $\pi \cdot r_{C_m}^2$  углеродного комплекса  $C_m$ :

$$U_m^- = N_m \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_C}} \cdot 4\pi r_{C_m}^2 \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right), \quad (2.121)$$

где:  $N_m$  - объемная концентрация атомов углерода в комплексе  $C_m$ ;  $E_m$  - энергия связи атома углерода на поверхности комплекса  $C_m$ .

После упрощений выражение (2.121) запишем:

$$U_m^- = \frac{\rho_C}{m_C} \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_C}} \cdot \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \cdot 4\pi \cdot r_{C_m}^2. \quad (2.122)$$

Скорость испарения  $U_m^-$  является функцией соотношения между энергией  $E_m$  связи атомов углерода  $C$  в углеродном комплексе и величиной  $kT$ . При  $kT \ll E_m$  величина  $U_m^-$  мала и испарением атомов можно пренебречь. По мере увеличения  $T$  скорость испарения существенно возрастает.

Поэтому можно записать:

$$\frac{dM_m}{d\tau} = 4\pi \cdot r_{C_m}^2 \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_{CH_4}}} \cdot N_{CH_4} \left[ 1 - \frac{\rho_C}{m_C} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \right]. \quad (2.123)$$

Уравнение (2.123) определяет изменение во времени массы одного углеродного комплекса  $C_m$ . Умножив это выражение на число углеродных комплексов  $C_m$  в единице объема, можно определить изменение во времени массовой концентрации углеродных комплексов  $C_m$ .

Поскольку процесс образования атомарного углерода происходит по выбранной ранее схеме, время индукции для процесса сажеобразования в МВС среде газодизеля можно определить как сумму времен отщепления каждого атома водорода:

$$\tau_{инд} = \tau_0 \sum_{n=1}^4 \exp\left[\frac{E_n}{kT}\right], \quad (2.124)$$

где:  $\tau_0$  - период собственных колебаний атомов водорода в углеводородных ассоциациях. В случае отсутствия коагуляции суммарное число образовавшихся сажевых частиц будет равно числу ядер-зародышей, образовавшихся в период индукции. Для равновесных условий время индукции составляет  $8,45 \dots 10^{-6}$  с, что по порядку совпадает с представленными в литературе [170, 188]. Время индукции тесно связано с временем пребывания молекул углеводорода в зоне термического разложения метана в МВС газодизеля в соответствующих локальных температурных полях в турбулентном потоке и определенными местными концентрациями окислителя. Таким образом, время индукции связано с протеканием турбулентного обмена в факеле и его аэродинамической микроструктурой.

### 3. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИК В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

#### 3.1. Методики исследований по улучшению эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа

##### 3.1.1. Методика стендовых исследований по улучшению эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа

В основу методики исследований положен сравнительный метод. Выполнение исследований производилось в несколько этапов.

На первом этапе предусматривалось определение оптимальных регулировок, получение эффективных показателей дизелей, определение параметров рабочего процесса путем индицирования, токсичности и дымности ОГ на различных скоростных и нагрузочных режимах при работе на ДТ.

На втором этапе предусматривалась разработка, изготовление и оптимизация систем дозирования и регулирования подачи газа, определение оптимальных регулировок, получение эффективных показателей, определение параметров рабочего процесса путем индицирования, токсичности и дымности ОГ на различных скоростных и нагрузочных режимах при работе дизелей по газодизельному процессу.

Общая структурная схема проведения стендовых исследований тракторных дизелей при использовании природного газа представлена на рис. 3.1. Для стендовых исследований каждого конкретного тракторного дизеля на основе общей структурной схемы разрабатывалась рабочая структурная схема, учитывающая особенности конструкций дизеля, систем питания, впуска и выпуска, систем охлаждения, а также поставленных задач. Модели тракторных дизелей для которых были проведены исследования по переводу на работу по газодизельному процессу представлены в табл. 3.1.

При стендовых исследованиях использовалось дизельное топливо марки Л-05 по ГОСТу 305-82, дизельное масло М-10-Г<sub>2</sub> по

ГОСТу 8581-78 и сжатый природный газ Ухтинского месторождения из газопровода "Сияние Севера" с составом, представленным в табл. 3.2. и соответствующий ГОСТу 27577-87. Плотность природного газа при нормальных условиях составила 0,673 кг/м<sup>3</sup>, а средняя удельная теплота сгорания 33,4 МДж/м<sup>3</sup>.

Учитывая специфику работы тракторных дизелей, основными режимами исследований являлись номинальные скоростные режимы и режимы максимальных крутящих моментов.

Разработка модификаций дизелей для работы на сжатом природном газе предусматривала в первую очередь сохранение мощностных и экономических показателей, присущих серийному дизелю. Задача сводилась к определению параметров газового смесителя-дозатора, обеспечивающих подачу газа в цилиндры дизеля в пределах по теплоте сгорания, эквивалентных для ДТ при качественном смесеобразовании газа с воздухом.

При расчете смесителя принималась конструкция газового смесителя-дозатора, включающая в себя патрубок для подвода воздуха, патрубок для газоздушной смеси для подачи в цилиндры, диффузор, кольцевую щель, через которую поступает газ в смесительную камеру газового смесителя-дозатора. В общем случае расчет смесителя сводился к определению характерных диаметров в соответствии со схемой на рис. 3.2., где:  $d_1$  - диаметр патрубка для подачи газоздушной смеси в цилиндры дизеля (диффузор), мм;  $d_2$  - диаметр патрубка, по которому в смеситель-дозатор поступает газ, мм;  $d_3$  - диаметр патрубка для подачи воздуха в смеситель, мм.

Тогда диаметр диффузора  $d_1$  определялся из выражения:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (3.1)$$

где:  $F$  - площадь диффузора, м<sup>2</sup>.

Площадь диффузора определяли по выражению:

$$F = \frac{G_{см}}{C}, \quad (3.2)$$

где:  $G_{см}$  - часовой расход смеси, м<sup>3</sup>/ч;

$C$  - скорость воздуха во впускном патрубке, м/с.

Часовой расход смеси для номинального режима работы дизеля определяли из выражения:

$$G_{см} = 0,03 \eta_v \cdot i \cdot V_h \cdot n, \quad (3.3)$$

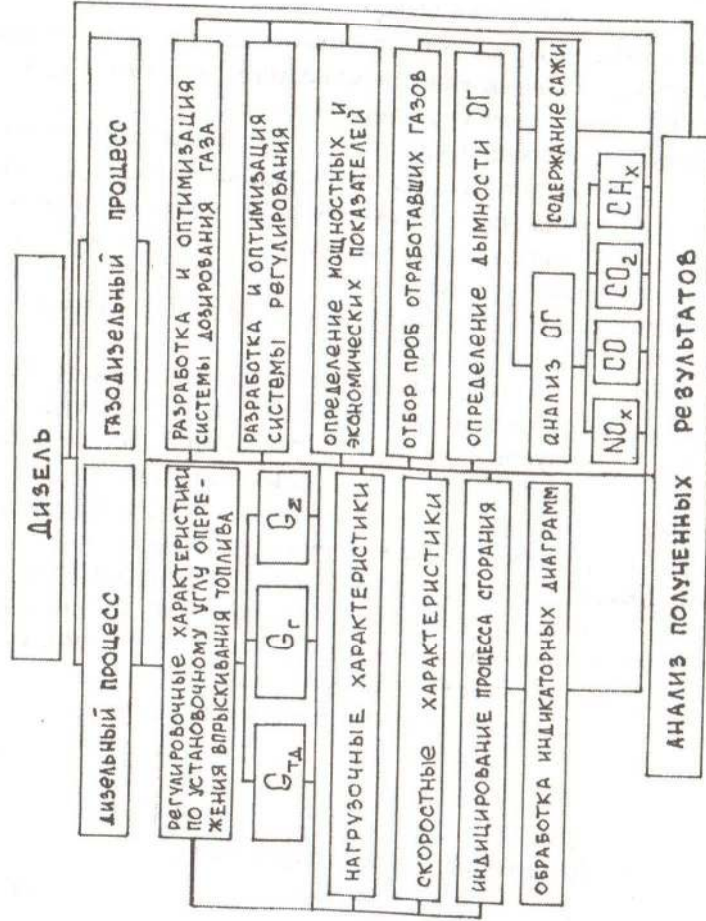


Рис. 3.1. Общая структурная схема стендовых исследований тракторных дизелей при применении природного газа в качестве моторного топлива

где:  $\eta_v$  - коэффициент наполнения дизеля на номинальном режиме;  $i \cdot V_h$  - рабочий объем двигателя, л;  $n$  - номинальная частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ .

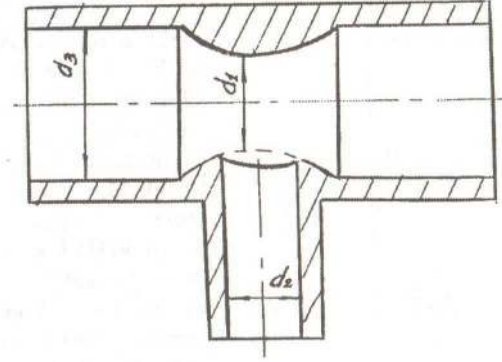


Рис. 3.2. Схема смесителя-дозатора для подачи природного газа

Скорость воздуха определяли из выражения:

$$C = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot 2g}{\rho}}, \quad (3.4)$$

где:  $\Delta p$  - разрежение во впускном патрубке, мм.вод.ст.;  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  - плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для обеспечения конвертации дизеля для работы по дизельному и газодизельному процессам, без ухудшения эффективности работы по обоим циклам снимались характеристики, позволяющие выявить закономерности изменения этих показателей от диаметра диффузоров. В случае ухудшения показателей работы со смесителем его диаметр изменялся. Количество газа, поступающего в цилиндры, регулировалось газовой заслонкой, установленной в дозаторе, а максимальное количество газа для получения номинальной мощности, исключая форсирование по среднему эффективному давлению, ограничивалось проходным сечением кольцевой щели диффузора смесителя, которое регулировалось и подбиралось экспериментально.

Таблица 3.1  
 Модели тракторных дизелей на которых проводились стендовые исследования по переводу на природный газ

Модель	Размерность	Страна изготовитель	Где устанавливаются	Тип системы охлаждения
Д-21А1	2Ч 10,5/12,0	РФ	Тракторы Т-25А, Т-30, шасси Т-16МГ и их модификации	Воздушная
Д-144	4Ч 10,5/12,0	РФ	Тракторы Т-40А, Т-40АМ, сварочные агрегаты АДД-4002У1 и их модификации	Воздушная
Д-115	3Ч 9,5/10,0	Румыния	Тракторы «Универсал-445» и их модификации	Жидкостная
Д-3900	4Ч 9,85/12,7	Болгария	Погрузчик 17.92	Жидкостная

Таблица 3.2  
 Состав природного газа, используемого при проведении стендовых исследований (Ухтинское месторождение, газопровод "Сияние Севера")

Наименование	Содержание, %
Метан	99,25
Этан	0,20
Пропан	0,09
Изобутан	0,03
Азот	0,39
Оксид углерода	0,01
Прочие	0,03
Сероводород	Отсутствие

В случае возникновения высокой неравномерности распределения газозоудной смеси по отдельным цилиндрам проводились соответствующие исследования и вносились изменения в конструкцию системы впуска. Минимальная доза запального (ДТ) топлива подбиралась на номинальном режиме, исходя из условия отсутствия пропусков воспламенения и устойчивой работы на холостом ходу.

При индцировании рабочего процесса дизеля с различным соотношением газозоудной смеси необходимым условием являлось сохранение одинаковых значений  $p_e$  для каждого исследуемого скоростного и нагрузочного режимов. Это же условие выполнялось и при снятии скоростных характеристик, т.е. на всех фиксируемых частотах вращения коленчатого вала поддерживалось одинаковое значение  $p_e$  при работе на ДТ и природном газе. Величина  $p_e$  определялась косвенным путем из показаний весового механизма нагрузочного устройства. Все характеристики снимались при оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива. Одновременно со снятием характеристик производилось индцирование и газовый анализ, а также отбор проб для определения дымности ОГ.

При монтаже оборудования и приборов, проведении исследований стабильности и стендовых испытаний, газовом анализе учитывались требования ГОСТа 18509-88, ГОСТа 20000-82, ГОСТа 14921-78, ГОСТа 17.2.2.05-86, ОСТА 23.1.440-76, ОСТА 23.1.441-76, а при анализе результатов требований ГОСТа 17.2.1.01-76, ГОСТа 17.2.1.02-76, ГОСТа 17.2.1.03-84, ГОСТа 17.2.1.04-77 [8...17, 337...340, 3343]. Обработка индикаторных диаграмм рабочего процесса дизеля при работе на различных режимах осуществлялось с помощью ЭВМ ЕС-1020 по методике ЦНИДИ [341, 342].

Отбор и анализ проб ОГ производился на автоматической системе газового анализа АСГА-Т с соблюдением требований инструкции к установке [343]. При некоторых испытаниях отбор проб ОГ производился с помощью пробоотборного зонда, изготовленного и установленного согласно ОСТА 23.1.440-76 [339], в вакуумированные стеклянные пипетки согласно методики [344] для последующего анализа на газоанализаторах.

Перед началом испытаний новый двигатель проходил обкатку продолжительностью 60 мото-часов на режимах, согласно технической документации завода-изготовителя. Перед началом проведения испытаний двигатель прогревался до температуры масла в поддоне в пределах 85...95°C. Температура окружающего воздуха и топлива во время опытов не превышала значений, указанных в технической документации завода-изготовителя. Техническое обслуживание дизелей проводилось в соответствии с инструкцией завода-изготовителя.

Значения мощности двигателя, крутящего момента, среднего эффективного давления и расходы топлива на различных скоростных режимах приводились к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива согласно ГОСТу 18509-88. После прогрева двигатель выводился на номинальный скоростной режим работы и определялись эффективные показатели. Этот режим являлся контрольным. Отклонения эффективных показателей дизеля более чем на 2% свидетельствовали о нарушении работы какой-либо системы двигателя, которое сразу же устранялось. После окончания испытаний дизель вновь выводился на контрольный режим и показатели проверялись. Для выравнивания температур дизель перед началом измерений работал на каждом режиме не менее 5 мин. Частота вращения коленчатого вала дизеля не отличалась от заданной более чем на  $5 \text{ мин}^{-1}$ . Объем камеры сгорания при установке датчика индикатора для индицирования дизеля увеличивался за счет соединительного канала под датчиком не более чем на 1%, а отношение диаметра соединительного канала к его длине было больше 1. Для уменьшения погрешностей измерений замер показателей при испытаниях в каждом опыте повторялся не менее 3 раз, а результат усреднялся. Таким же образом производился газовый анализ и определение дымности ОГ.

### 3.1.2. Особенности методики по разработке макетных образцов тракторов с улучшенными эксплуатационными показателями тракторных дизелей для работы на природном газе

Особенности методики по разработке макетных образцов тракторов для работы на сжатом природном газе заключались в первую очередь в разработке концепции газобаллонного трактора. Концепция учитывала особенности эксплуатации трактора, запас природного газа на борту, основные режимы работы, системы защиты и остановки дизеля. Структурная схема разработки макетных образцов тракторов для работы на сжатом природном газе представлена на рис. 3.3. Структурная схема предусматривала оптимальное размещение газобаллонного оборудования трактора с учетом требований техники безопасности, оптимизацию регулировок систем дозирова-

ния и регулирования трактора при работе по дизельному и газодизельному процессам.

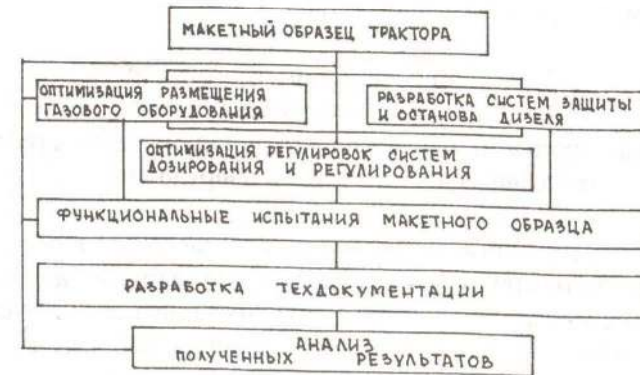


Рис. 3.3. Структурная схема разработки макетных образцов тракторов для работы на сжатом природном газе

Таблица 3.3

Модели тракторов и агрегатов, на базе которых созданы макетные образцы для работы на сжатом природном газе

№	Модель трактора или агрегата	Модель дизеля	Размерность дизеля	Количество баллонов для газа
1	Т-25А	Д-21А1	2Ч 10,5/12,0	2
2	Т-16МГ	Д-21А1	2Ч 10,5/12,0	4
3	АДД-4002У1	Д-144	4Ч 10,5/12,0	4
4	Универсал-445	Д-115	3Ч 9,5/10,0	4
5	Погрузчик 17.92	Д-3900	4Ч 9,85/12,7	4

Кроме того, проводились функциональные испытания макетного образца и разрабатывалась документация по эксплуатации

газового оборудования трактора. На основе анализа полученных результатов производилась оптимизация работы и конструкции газобаллонного трактора. Перечень тракторов и агрегатов, на базе которых созданы макетные образцы для работы на сжатом природном газе, представлены в табл. 3.3.

### 3.2. Экспериментальные установки.

#### Приборы и оборудование

#### 3.2.1. Экспериментальные установки для проведения стендовых исследований. Приборы и оборудование

Экспериментальные установки по исследованию возможности улучшения эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения природного газа создавались в научно-исследовательской лаборатории по испытанию ДВС кафедры тракторов и автомобилей Вятской государственной сельхозакадемии на базе электротормозного стенда SAK-N670 производства Германии с балансирной маятниковой машиной и измерительного комплекса. Общий вид пульта управления представлен на рис. 3.4. При исследованиях тракторных дизелей, работающих на природном газе, установки создавались с использованием двигателей, указанных ранее в табл. 3.1. Экспериментальные установки оборудовались необходимым измерительным оборудованием и приборами, основные из которых представлены в табл. 3.4. Соединение коленчатого вала двигателя установки и вала стенда осуществлялось карданным валом. Частота вращения коленчатого вала дизеля измерялась электронными цифровыми тахометрами ТЦ-1 или ТЭМП-4.

Индицирование дизеля производилось электропневматическим индикатором МАИ-5А. Пишущая часть индикатора устанавливалась соосно коленчатому валу дизеля и соединялась с ним гибкой резинометаллической муфтой. Вид на установленный индикатор МАИ-5А показан на рис. 3.5. Датчик отметки ВМТ устанавливался на корпусе маховика дизеля согласно инструкции к индикатору. Учитывая то, что правильность отметки ВМТ в значительной мере влияет на точность обработки индикаторных диаграмм, установка датчика отметки ВМТ корректировалась по положению в ВМТ поршня цилиндра и проверялась по диаграмме сжатия-расширения без подачи топлива. Датчик давления устанавливался во втулке,

вмонтированной в головку цилиндра, согласно инструкции к индикатору. Расход топлива определялся электронным расходомером топлива АИР-50 массовым способом.

Таблица 3.4

Приборы и аппаратура для экспериментальных исследований

№ п/п	Наименование	Марка, модель	Назначение
1	Балансирный тормозной стенд	SAK-N670	Измерение крутящего момента
2	Тахометр	ТЦ-1, ТЭМП-4	Измерение частоты вращения
3	Расходомер топлива	Д-1, АИР-50	Расход топлива
4	Расходомер газа	ГФК-6	Расход газа
5	Секундомер	Д-1, ТЭМП-4	Время отсчета
6	Расходомер воздуха	РГ-250	Расход воздуха
7	Счетчик импульсов	МЭС-66	Измерение числа импульсов
8	Манометр	U-образный	Разрежение и давление
9	Логомер	М-64	Температура отработавших газов
10	Индикатор	МАИ-5А	Давление газов в цилиндре
11	Стенд	КИ-22205	Регулировки топливного насоса
12	Стенд	КИ-3333	Регулировки топливного насоса
13	Гомогенизатор	MPW-324	Приготовление топливной эмульсии
14	Хроматограф	Газохром 3101, ЛХМ-8М 3 модель	Определение оксидов углерода
15	Фотоэлектрокалориметр	ФЭК-56М	Определение оксидов азота
16	Система газового анализа	АСГА-Т	Определение компонентов ОГ
17	Сажемер	«Боп» EFAW-68А	Определение содержания сажи
18	Вискозиметр	ВПЖ-4	Определение вязкости жидкости





Рис. 3.4. Общий вид пульта управления тормозным стендом SAK-N 670 и экспериментальной установкой

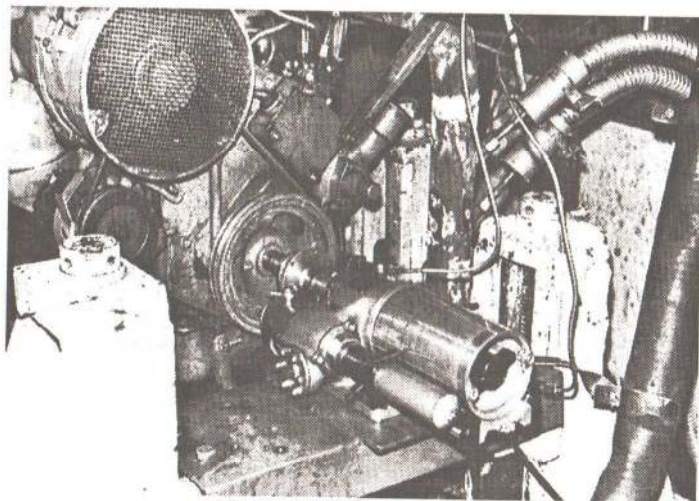


Рис. 3.5. Вид на записывающее устройство индикатора МАИ-5А

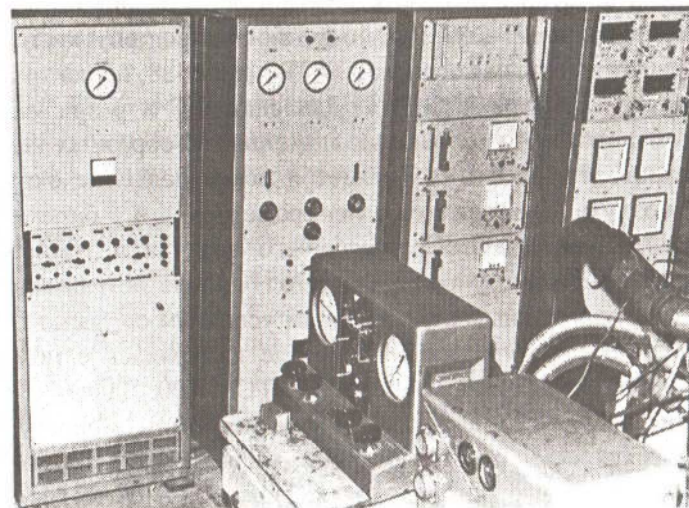


Рис. 3.6. Общий вид системы газового анализа АСГА-Т

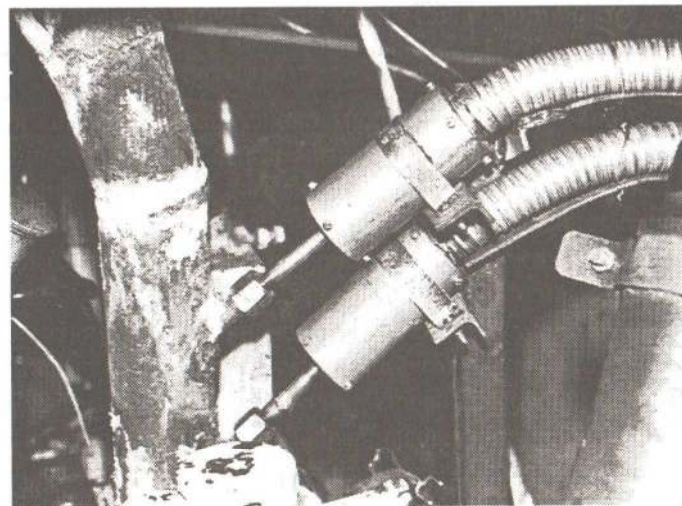


Рис. 3.7. Вид на установленные заборники для непрерывного отбора проб отработавших газов для системы АСГА-Т

Расход воздуха при работе дизелей определялся с помощью газового счетчика РГ-250, установленного перед впускным ресивером, изготовленным согласно ГОСТу 18509-88, и электронного цифрового тахометра ТЭМП-4. Давление ОГ и разрежение во впускном патрубке измерялось с помощью U-образных водяных манометров. Влажность и барометрическое давление окружающего воздуха измерялись психрометром и барометром-анероидом. Температура окружающего воздуха и температура топлив измерялись термометрами. Полученные результаты приводились к нормальным атмосферным условиям согласно ГОСТу 18509-88. Температура масла в дизеле измерялась с помощью термосифонного датчика температуры ТСМ-100. Давление масла в системе измерялось датчиком и манометром. Температура ОГ дизеля замерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар. В качестве вторичного прибора применялся логомер М-64. Перед началом испытаний и после их окончания весовой механизм "Рапидо" балансирной маятниковой машины тарировался с помощью эталонных гирь.

Анализ проб ОГ производился на автоматической системе газового анализа АСГА-Т (рис. 3.6). Отбор проб ОГ осуществлялся через установленные, согласно инструкции к АСГА-Т на впускном тракте дизеля, газозаборники. Вид на заборники представлен на рис. 3.7. Перед началом газового анализа система прогревалась в течение 1,5...2 часов, после чего производилась калибровка ГИПов поверочными газовыми смесями (ПГС). Дымность ОГ измерялась с помощью сажемера "БОШ"-EFAW-68A.

Проверка и регулировка топливного насоса и форсунок осуществлялись на комплексном стенде для испытаний топливной аппаратуры КИ-22205, оборудованном электронной системой измерения угла впрыскивания топлива М 3.558.048.

Для проведения исследований, согласно общей методики, для каждого двигателя при использовании природного газа разрабатывались специальные экспериментальные установки, особенности которых изложены ниже.

### 3.2.2. Особенности экспериментальных установок, приборов и оборудования для исследования применения природного газа в тракторных дизелях

#### 3.2.2.1. Особенности экспериментальной установки, приборов и оборудования для исследования применения природного газа в дизеле 2Ч 10,5/12,0

Экспериментальная установка для исследования работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 создана на базе измерительно-исследовательского комплекса, описание которого дано в разделе 3.2.1.

В качестве объекта исследований был выбран двухцилиндровый дизель воздушного охлаждения с полусферической камерой в поршне производства Владимирского тракторного завода 2Ч 10,5/12,0 трактора Т-25А1. Для управления подачей газа в дизель был смонтирован специальный пульт управления.

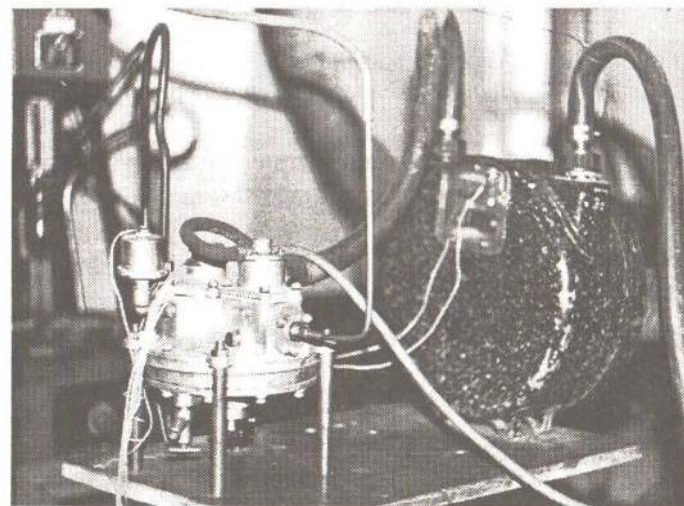


Рис. 3.8. Вид на счетчик расхода газа ГФК-6 и двухступенчатый редуктор

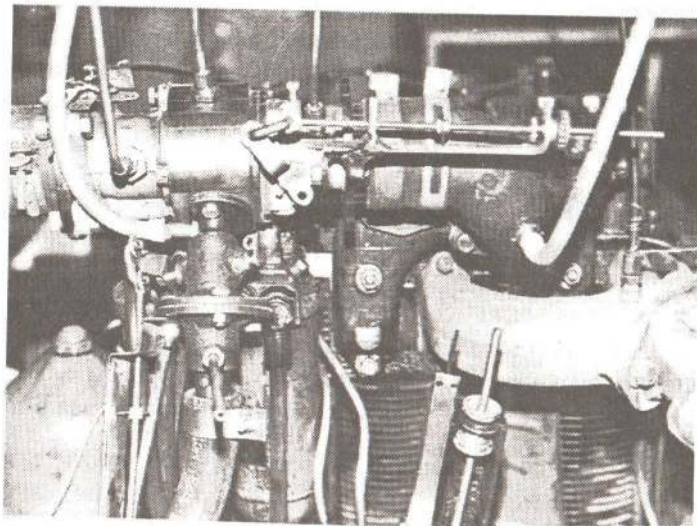


Рис. 3.9. Общий вид смесителя-дозатора для подачи природного газа дизеля 2Ч 10,5/12,0, подготовленного для проведения исследований

При выполнении исследований при использовании природного газа в качестве топлива на экспериментальном стенде применялись запорная арматура и штатное оборудование газобаллонного автомобиля ЗИЛ-138А. Двухступенчатый редуктор для снижения давления газа монтировался непосредственно рядом со счетчиком расхода газа. Расход газа измерялся счетчиком ГФК-6, модернизированным для работы с электромагнитным счетчиком МЭС-66.

Разрежение и давление в системах впуска и выпуска определялись с помощью U-образных манометров. Для экспериментальной установки был выбран вариант смесителя дозатора с тремя регулировочными заслонками: воздушной, газовой и газозадушной. Такая схема смесителя-дозатора позволила определить оптимальные подачи природного газа и воздуха, а также варьировать изменение коэффициента избытка воздуха в широких пределах.

Детали смесителя-дозатора соединялись с помощью болтовых соединений и уплотнялись с помощью прокладок. В корпусных деталях имелись отверстия для присоединения трубок вакуумметров и измерения разрежений. Общий вид смесителя-дозатора на дизеле 2 Ч 10,5/12,0, подготовленном для проведения исследований, представлен на рис. 3.9.

### 3.2.2.2. Передвижной заправщик для сжатого природного газа

Для обеспечения экспериментальных исследований сжатым природным газом была создана передвижная заправочная станция на базе тракторного прицепа 2 ПТС-4,0 и газобаллонного оборудования автомобиля ЗИЛ-138А. Станция представляет собой два комплекта баллонов высокого давления автомобиля ЗИЛ-138А (16 штук), соединенных параллельно по 8 штук.

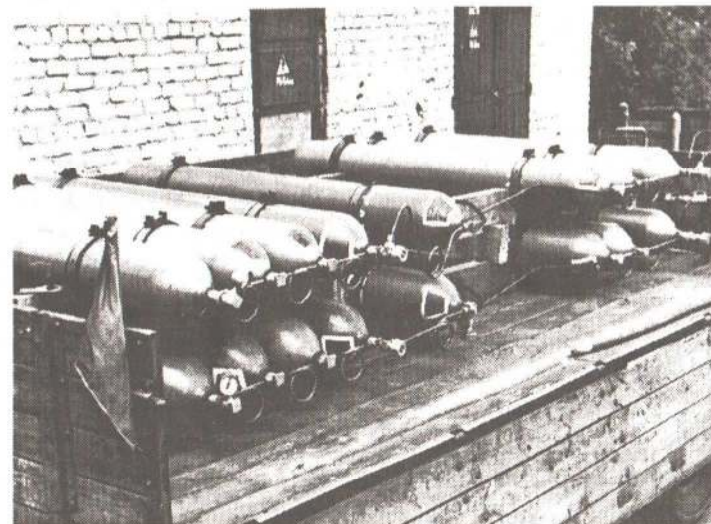


Рис. 3.10. Общий вид передвижной заправочной станции для сжатого природного газа

Баллоны первого ряда лежат на серийных деревянных подрамниках и крепятся стандартными хомутами с прокладками. Второй ряд подрамников лежит на поперечных деревянных лонжеронах. Баллоны к подрамникам также крепятся хомутами с прокладками. Вид на заправочную станцию для сжатого природного газа представлен на рис. 3.10. Баллоны заправщика заправляются с помощью штатного вентиля и крестовины от автомобильной газозаправочной станции через гибкие шланги высокого давления под давлением до 15 МПа, которое контролируется манометрами.

Присоединение экспериментальной установки к передвижному заправщику осуществлялось с помощью понижающего редуктора, расположенного на заправочной крестовине, и гибкого шланга высокого давления. Емкость одного баллона - 50 литров, общая емкость заправщика - 800 литров, рабочее давление - до 15 МПа.

### 3.2.2.3. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 4Ч 10,5/12,0

Экспериментальная установка для исследования работы дизеля 4Ч 10,5/12,0 на природном газе создана на базе измерительно-исследовательского комплекса, описание которого дано в разделе 3.2.1.

В качестве объекта исследований был выбран четырехцилиндровый дизель воздушного охлаждения с полусферической камерой в поршне производства Владимирского тракторного завода 4Ч 10,5/12,0, устанавливаемый на тракторы Т-40А и его модификации, а также на дорожные и строительные машины, сварочные агрегаты АДД-4002У1 и т.д. Общий вид дизеля 4Ч 10,5/12,0, установленного на стенде и подготовленного к исследованиям при работе на сжатом природном газе с оптимизированным впускным трубопроводом, представлен на рис. 3.11.

Измерительная и регистрирующая аппаратура применялась такая же, что и при проведении исследований дизеля 2Ч 10,5/12,0.

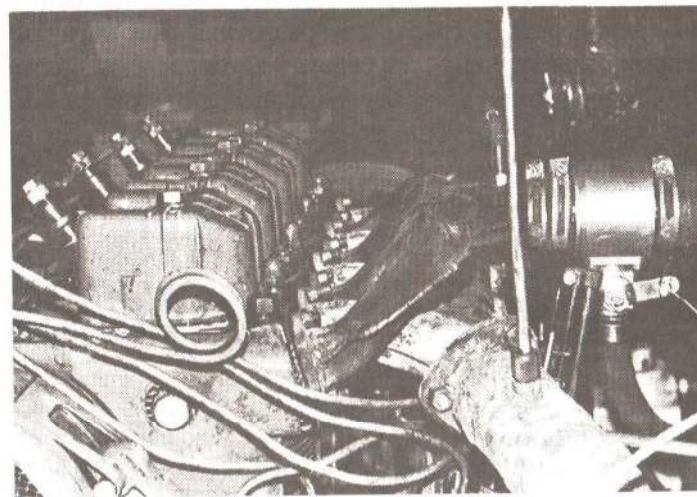


Рис. 3.11. Общий вид дизеля 4Ч 10,5/12,0, установленного на стенде

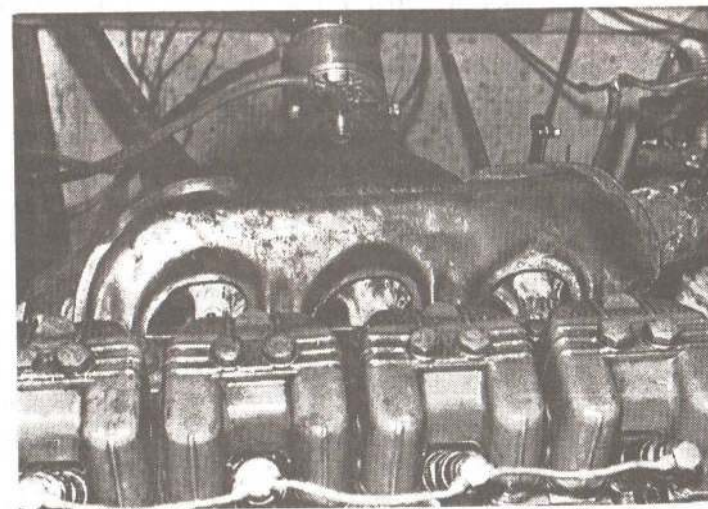


Рис. 3.12. Вид сверху на измененный впускной трубопровод дизеля 4Ч 10,5/12,0, оптимизированный для равномерной подачи природного газа по цилиндрам

Индицирование дизеля осуществлялось в 1 и 4 цилиндрах, с целью выяснения равномерности распределения газа по цилиндрам. Измененная конструкция впускного трубопровода дизеля 4Ч 10,5/12,0, позволяющая равномерно распределить природный газ по всем четырем цилиндрам, представлена на рис. 3.12. На рисунке также виден универсальный газовый смеситель-дозатор, разработанный на базе смесителя-дозатора дизеля 2Ч 10,5/12,0. Конструкция смесителя-дозатора будет рассмотрена в главе 4.1.

#### 3.2.2.4. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 3Ч 9,5/10,0

Экспериментальная установка для исследования работы дизеля 3Ч 9,5/10,0 (Д-115) на природном газе создана на базе измерительно-исследовательского комплекса, описание которого дано в разделе 3.2.1. В качестве объекта исследований был выбран трехцилиндровый дизель жидкостного охлаждения с тороидальной камерой в поршне производства Брашевского завода (3Ч 9,5/10,0), выпускаемый по лицензии итальянской фирмы "Фиат" и устанавливаемый на тракторы "Универсал-445" (Румыния).

Поперечный разрез дизеля 3Ч 9,5/10,0 представлен на рис. 3.13.

#### 3.2.2.5. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 4Ч 9,85/12,7

Экспериментальная установка для исследования работы дизеля 4Ч 9,85/12,7 (Д-3900) на природном газе создана на базе измерительно-исследовательского комплекса, описание которого дано в разделе 3.2.1. В качестве объекта исследований был выбран четырехцилиндровый дизель жидкостного охлаждения с неразделенной камерой в поршне производства комбината Васил Коларов 4Ч 9,85/12,7 (Болгария), выпускаемый по лицензии английской фирмы "Перкинс" и устанавливаемый на самоходные погрузчики модели 17.92 и сельскохозяйственные тракторы.

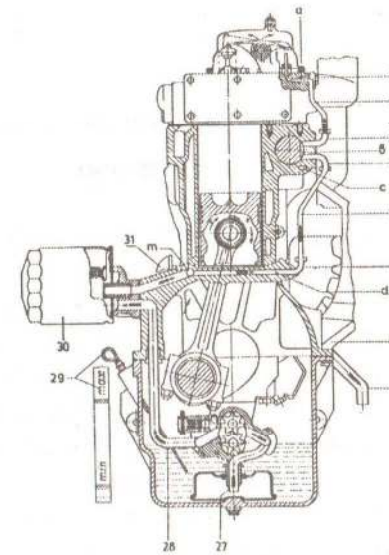


Рис. 3.13. Поперечный разрез дизеля 3Ч 9,5/10,0

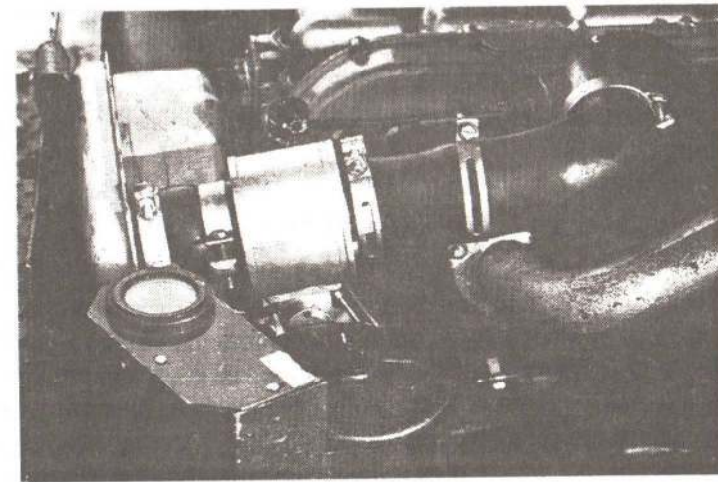


Рис. 3.14. Вид на смеситель-дозатор для подачи природного газа дизеля 4Ч 9,85/12,7

Общий вид на смеситель-дозатор для подачи природного газа дизеля 4Ч 9,85/12,7 представлен на рис. 3.14.

### 3.3. Обработка результатов исследований. Ошибки измерений

Измерение исследуемых величин всегда связано с погрешностями, поэтому полученные величины всегда имеют приближенные значения, степень приближения которых зависит от правильности выбора и возможностей прибора, условий проведения опыта. Для оценки объективности данных, полученных в результате исследований, производился подсчет ошибок измерения величин и определялась суммарная погрешность результатов опыта. Допускалось, что при выполнении опытов имелись только систематические ошибки. Появление случайных погрешностей исключалось ввиду проведения проверок приборов и поддержания постоянных условий проведения опытов. Математическая обработка результатов производилась в соответствии с существующими нормами [346...356].

Для сложной функции вида  $N_e = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  абсолютная ошибка равна сумме частных, в каждой из которых за переменную принимается только один из аргументов:

$$\Delta N = \pm [\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)], \quad (3.5)$$

где:  $N$  - истинная величина;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - результат измерения величин.

Относительная ошибка:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{[\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)]}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}. \quad (3.6)$$

После анализа источников погрешностей измерений появляется возможность подсчета суммарной ошибки опыта. При определении этой величины брался самый неблагоприятный случай, когда все частные ошибки берутся со знаком "+". Придерживался следующий порядок определения: оценивались размеры частных предельных погрешностей по отдельным элементам измерений, входящих в опыт, затем подсчитывались абсолютная и относительная ошибки результатов измерений. Относительная погрешность определения эффективной мощности, вычисляемой по формуле:

$$N_e = \pm \frac{M_k \cdot n}{9550}, \quad (3.7)$$

где:  $M_k = P_T \cdot l$  - крутящий момент;  $P_T$  - показания тормоза;  $l$  - длина плеча весового механизма;  $n$  - частота вращения коленчатого вала;

определялась из выражения:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \pm \left( \frac{\Delta P_T}{P_T} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right). \quad (3.8)$$

Относительная погрешность определения основного, дополнительного и суммарного расходов топлива, вычисляемых по формулам:

$$G_T = \frac{q_{оп}}{\tau_{оп}}, \quad G_{T\Sigma} = G_T + G'_T,$$

где:  $q_{оп}$  - количество топлива, расходуемого за опыт;  $\tau_{оп}$  - время опыта;

определялись из соответствующих выражений:

$$\frac{\Delta G_T}{G_T} = \pm \left( \frac{\Delta q_{оп}}{q_{оп}} + \frac{\Delta \tau_{оп}}{\tau_{оп}} \right), \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta G_{T\Sigma}}{G_{T\Sigma}} = \pm \frac{\Delta G_T + \Delta G'_T}{G_T} = \pm \left( \frac{\Delta q_{оп}}{q_{оп}} + \frac{\Delta \tau_{оп}}{\tau_{оп}} \right) \cdot \frac{G_T}{G_{T\Sigma}} \pm \left( \frac{\Delta q'_{оп}}{q_{оп}} + \frac{\Delta \tau_{оп}}{\tau_{оп}} \right) \cdot \frac{G'_T}{G_{T\Sigma}}. \quad (3.10)$$

Относительная погрешность определения удельного эффективного расхода топлива, вычисляемого по формуле, определялась из выражения:

$$\frac{\Delta q_e}{q_e} = \pm \left( \frac{\Delta G_{T\Sigma}}{G_{T\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e} \right) = \pm \left( \frac{\Delta q_{оп}}{q_{оп}} + \frac{\Delta \tau_{оп}}{\tau_{оп}} \right) \cdot \frac{G_T}{G_{T\Sigma}} \pm \left( \frac{\Delta q'_{оп}}{q_{оп}} + \frac{\Delta \tau_{оп}}{\tau_{оп}} \right) \cdot \frac{G'_T}{G_{T\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e}. \quad (3.11)$$

Аналогичным образом определялась оценка погрешностей других измеряемых величин. Значение основной погрешности измеряемых системой АСГА-Т токсичных компонентов представлено в табл. 3.5. Величины предельных ошибок вычислений и измерений представлены в табл. 3.6

Таблица 3.5  
Значение основной погрешности измеряемых системой АСГА-Т  
токсичных компонентов

Измеряемый компонент	Диапазон измерений (объемные доли)	Предел допустимой ос- новной погрешности, %
1	2	3
Оксид углерода (CO)	0...10%	±2,5
	0...2,5%	±4,0
	0...1,0%	±5,0
	0...1000 ppm	±5,0
	0...500 ppm	±5,0
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0...15%	±4,0
	0...5%	±4,0
Углеводороды (по CH <sub>4</sub> )	0...5%	±5,0
	0...1%	±5,0
	0...2000 ppm	±5,0
	0...1000 ppm	±10,0
	0...500 ppm	±10,0
	0...200 ppm	±10,0
	0...100 ppm	±15,0
	0...50 ppm	±15,0
Оксиды азота (по NO)	0...0,5%	±15,0
	0...1000 ppm	±15,0
	0...500 ppm	±15,0
	0...200 ppm	±15,0
	0...100 ppm	±20,0
	0...50 ppm	±20,0

Таблица 3.6  
Предельные ошибки вычислений и измерений

Наименование величины	Предельная абсолютная ошибка	Предельная относительная ошибка
1	2	3
1. Показания тормоза	1 Н	±0,05
2. Частота вращения коленчатого вала	2 мин <sup>-1</sup>	±0,004

Продолжение табл. 3.6

1	2	3
3. Крутящий момент	1 Нм	±0,05
4. Мощность	0,1 кВт	±0,3
5. Среднее эффективное давление	0,01 МПа	±0,05
6. Число импульсов на счетчике электронного тахометра	2 имп.	±0,05
7. Часовой расход основного и дополнительного топлива	0,01 кг/ч	±0,02
8. Часовой расход суммарного топлива	0,01 кг/ч	±0,02
9. Удельный расход топлива	1,1 г/кВт·ч	±0,5
10. Часовой расход воздуха	1,0 кг/ч	±0,1
11. Часовой расход газа	0,02 м <sup>3</sup> /ч	±0,02
12. Коэффициент избытка воздуха	0,01	±2,1
13. Температура ОГ	5°С	±0,022
14. Разрежение во впускном трубопроводе	49,05 Па	±0,25
15. Давление ОГ в выпускном трубопроводе	49,05 Па	±2,2
16. Давление окружающего воздуха	0,1 кПа	±0,001
17. Давление масла в главной масляной магистрали	10 кПа	±0,05
18. Температура окружающего воздуха	1°С	±0,06
19. Температура топлива	1°С	±0,06
20. Относительная влажность окружающего воздуха	1%	±0,024
21. Концентрация NO <sub>x</sub>	20%	±2,5
22. Концентрация CO	5%	±0,05
23. Концентрация CO <sub>2</sub>	4%	±0,04
24. Концентрация CH <sub>x</sub>	15%	±0,15
25. Концентрация С	0,1 ед по шкале Боша	±0,1
26. Кинематическая вязкость	0,05 сСт	±2,0
27. Цикловая подача	0,001 мл/ц	±0,03
28. Длительность впрыскивания	0,1° п.к.в.	±0,01

#### 4. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ПРИРОДНОГО ГАЗА

##### 4.1. Результаты разработки и оптимизации смесителей-дозаторов и впускных трубопроводов тракторных дизелей при использовании природного газа

Разработка модификаций тракторных дизелей для работы на сжатом природном газе предусматривала в первую очередь возможность сохранения их мощностных и экономических показателей при конвертации двигателей [357...374]. Методика, изложенная в разделе 3.1.1, предусматривала после расчета газоздушного смесителя-дозатора проверку в стендовых условиях его влияния на мощностные и экономические показатели дизеля. В случае их ухудшения производилась оптимизация основных размеров смесителей-дозаторов по результатам испытаний.

В результате проведенных исследований был разработан унифицированный ряд газоздушных смесителей-дозаторов для тракторных дизелей с объемом двигателей от 2,0 до 4,0 литров. Основные расчетные и конструктивные параметры газоздушных смесителей-дозаторов для подачи природного газа в исследуемые тракторные дизели представлены в табл. 4.1.

Поперечный разрез газоздушного смесителя-дозатора для подачи природного газа в дизель 4Ч 10,5/12,0 представлен на рис. 4.1. Расчет производился для определения параметров смесителя-дозатора, обеспечивающих подачу газа в цилиндры дизеля в пределах, по теплоте сгорания эквивалентных для дизельного топлива, при качественном смесеобразовании газа с воздухом.

Количество газа, поступающего в цилиндры дизеля, регулируется дроссельной заслонкой 13, установленной в дозаторе, а максимальное количество газа для получения номинальной мощности, исключая форсирование по среднему эффективному давлению, ограничивается проходным сечением кольцевой щели диффузора смесителя, которое регулируется и подбирается экспериментально. Оптимизация основных размеров смесителей-дозаторов производилась следующим образом.

Таблица 4.1

Основные расчетные и конструктивные параметры смесителей-дозаторов для подачи природного газа в тракторные дизели

Модель дизеля	Д-21А1	Д-144	Д-115	Д-3900
Размерность дизеля	2Ч 10,5/12,0	4Ч 10,5/12,0	3Ч 9,5/10,0	4Ч 9,85/12,7
Рабочий объем, л	2,08	4,16	2,34	3,9
Номинальный скоростной режим, мин <sup>-1</sup>	1800	1800	2400	2400
Разрежение во впускном трубопроводе, мм вод. ст.	160	320	220	300
Скорость воздуха во впускном трубопроводе (расчетная), м/с	49,0	69,7	57,8	67,5
Часовой расход смеси, м <sup>3</sup> /ч	95,5	190,9	138,2	238,7
Диаметр диффузора d <sub>1</sub> (расчетный), мм	26	31	29	35
Диаметр диффузора d <sub>1</sub> после оптимизации, мм	30	40	35	40
Диаметр d <sub>2</sub> для газовой заслонки, мм	28	28	28	28
Диаметр d <sub>3</sub> для воздушного патрубка, мм	50	58	50	50

Так, для дизеля 4Ч 10,5/12,0 расчетный размер диффузора составил 31 мм. Однако при таких параметрах смесителя-дозатора дизель развивал удовлетворительные эффективные показатели при работе по газодизельному процессу и существенно ухудшал показатели при работе по дизельному циклу с установленным на впускном трубопроводе газовым смесителем-дозатором. Для обеспечения конвертации дизеля для работы по дизельному и газодизельному процессам и для повышения эффективных показателей при работе по обоим циклам была снята серия характеристик, позволяющая выявить закономерность изменения этих показателей от диаметра диффузора.

Из графиков, представленных на рис. 4.2., следует, что с уменьшением диаметра диффузора менее 40 мм значительно ухудшается процесс наполнения цилиндров свежим зарядом из-за повы-



шения сопротивления на впуске, о чем свидетельствует рост разрежения во впускном трубопроводе, что влечет за собой увеличение часового и удельного эффективного расходов топлива, ухудшение процесса сгорания из-за нехватки кислорода и падение эффективно-го к.п.д. Увеличение диаметра диффузора выше 40 мм не оказывает существенного влияния на улучшение эффективных показателей по сравнению со штатным впускным трубопроводом. Поэтому для получения, с одной стороны, качественного смесеобразования при работе по газодизельному циклу и получения приемлемых значений эффективных показателей при конвертации на дизельный процесс конструкция смесителя-дозатора укомплектована сменным диффузором диаметром 40 мм. При разработке газодизельной модификации дизеля 4Ч 10,5/12,0 проявился момент, касающийся очень высокой степени неравномерности распределения газозвушной смеси по отдельным цилиндрам. Конструкция впускного трубопровода такова, что обеспечивает наибольшую подачу смеси в 1-й цилиндр, и наименьшую в 4-й при установке газового смесителя на серийный патрубок, как показано на рис. 4.3,а. Индексирование в 1-м и 4-м цилиндрах показало, что при работе по дизельному циклу отличий в характере протекания процесса сгорания не наблюдается, а при переводе дизеля на газодизельный цикл максимальное давление сгорания в 1-м цилиндре достигает 9,99 МПа, а в 4-м цилиндре только 7,78 МПа при частоте вращения коленчатого вала  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , при  $p_c = 0,61 \text{ МПа}$  и  $\Theta_{\text{впр}} = 26$  градусов. Естественно, что такое неравнозначное давление в цилиндрах будет способствовать существенному неравномерному нагружению как деталей цилиндро-поршневой группы, так и подшипников и шеек коленчатого вала, и повышению неравномерности крутящего момента в целом. Впускной коллектор дизеля 2Ч 10,5/12,0 имеет несколько иную схему - фланец для крепления воздуховода от фильтра непосредственно к впускному трубопроводу расположен посредине между цилиндрами.

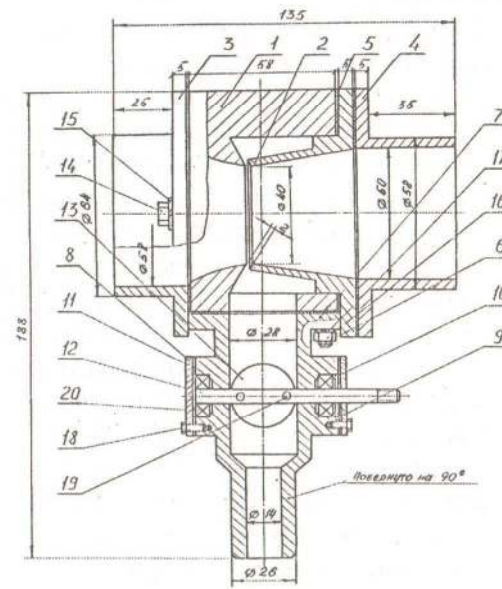


Рис. 4.1. Газовоздушный смеситель-дозатор для подачи природного газа дизеля 4Ч 10,5/12,0: 1 - корпус; 2 - диффузор; 3 - патрубок воздушный; 4 - патрубок соединительный; 5 - прокладка; 6 - шпилька; 7 - корпус дозатора; 8 - крышка глухая; 9 - крышка; 10 - шайба уплотнительная; 11 - прокладка; 12 - ось заслонки; 13 - заслонка газовая; 14 - болт соединительный; 15 - шайба; 16 - гайка; 17 - шайба; 18 - болт; 19 - винт; 20 - подшипник

Поэтому воздушный поток и газозвушной при работе на газе распределяются равномерно по обоим цилиндрам, поскольку оба рукава трубопровода, от места присоединения к нему воздушного патрубка до головки цилиндров, имеют одинаковую длину. По такому принципу и была разработана схема впускного трубопровода с установленным на него газовым смесителем-дозатором, показанная на рис. 4.3,б.

Однако в этом случае в равных условиях оказывались группы цилиндров: 1 и 4, 2 и 3, а между собой эти группы все равно отличались разными условиями работы: 2-й и 3-й цилиндры, вследствие поступления в них большего количества газозвушной смеси, оставались более нагруженными по отношению к 1-му и 4-му цилинд-

рам. В связи с этим конструкция впускного трубопровода была доработана. Газовый смеситель устанавливался на конфузоре 5 (см. рис. 4.3,в), который гасил скорость газоздушного потока, давая ему возможность более равномерно распределиться по впускному трубопроводу. Кроме того, установленный в конфузоре рассекаватель потока 4 делил этот поток на равные части между 1, 2 и 3, 4 цилиндрами и направлял их преимущественно в сторону крайних цилиндров. В результате между крайними и средними (1 и 2, 3 и 4) цилиндрами также происходило более равномерное распределение газоздушной смеси. При схеме "б" давление  $p_z$  в 1 и 4 цилиндрах хотя и было одинаковым, имело существенно меньшие значения, чем  $p_z$  в 1 цилиндре при схеме "а". При схеме "в" максимальное давление сгорания в 1 и 4 цилиндрах тоже было одинаковым, но имело большие значения при той же нагрузке, чем при схеме "б", что свидетельствует о более равномерном распределении газоздушной смеси по цилиндрам по сравнению со схемой "б". Эта конструкция была взята за основу, установлена на дизель и с ней проводились испытания газодизельной модификации дизеля 4Ч 10,5/12,0.

На дизеле 3Ч 9,5/10,0 были проведены исследования равномерности распределения газоздушной смеси по цилиндрам в зависимости от места установки на впускном трубопроводе газоздушно-го смесителя-дозатора.

При этом исследовались четыре варианта установки смесителя-дозатора:

- I вариант - смеситель-дозатор располагался непосредственно на впускном патрубке рядом с головкой цилиндров;
- II вариант - смеситель-дозатор располагался в этом же месте, но под газоздушный патрубок устанавливался завихритель потока (кольцо с направляющими лопастями);
- III вариант - смеситель-дозатор располагался на впускном трубопроводе на расстоянии 500 мм от головки цилиндров и имел завихритель потока;
- IV вариант - смеситель-дозатор располагался на впускном трубопроводе на расстоянии 500 мм от головки цилиндров, но завихритель потока отсутствовал.

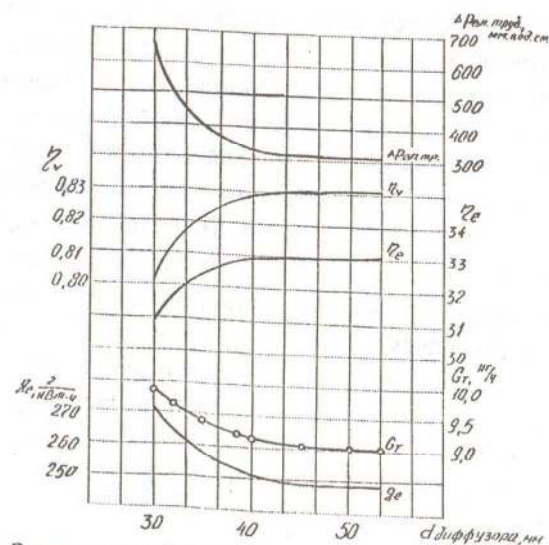


Рис. 4.2. Зависимость эффективных показателей дизеля 4Ч 10,5/12,0 от диаметра диффузора газоздушно-го смесителя-дозатора при работе по дизельному циклу при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c=0,60 \text{ МПа}$

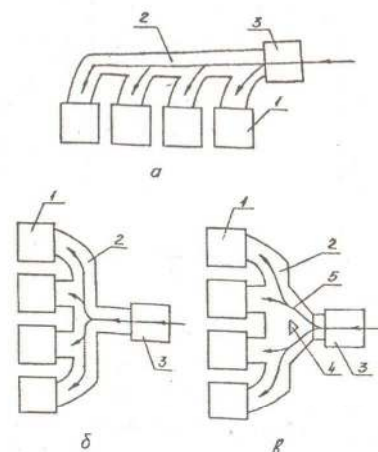


Рис. 4.3. Схемы впускных трубопроводов дизеля 4Ч 10,5/12,0: а - смеситель расположен на серийном впускном трубопроводе; б - вариант с центральным расположением смесителя; в - вариант с центральным расположением смесителя, конфузуром и рассекавателем потока; 1 - цилиндр; 2 - впускной трубопровод; 3 - смеситель-дозатор; 4 - рассекаватель потока; 5 - конфузор

Исследования проводились при частоте вращения  $2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $1400 \text{ мин}^{-1}$ . Дизель прокручивался с помощью стенда без подачи ДТ, но с подачей природного газа в цилиндры. Из впускного трубопровода против каждого цилиндра через отверстия отбирались пробы ОГ в вакуумированные стеклянные колбы. Затем производилось определение объемного содержания метана в % и строились графики.

На рис. 4.4 представлен график распределения метана по цилиндрам дизеля ЗЧ 9,5/10,0 в зависимости от варианта установки смесителя-дозатора. Из графиков видно, что конструкция впускного трубопровода исследуемого дизеля обеспечивает равномерное распределение газа по цилиндрам, независимо от его месторасположения. При этом изменяется только количество поступающего в цилиндры дизеля метана. Это дало возможность обосновать место установки смесителя-дозатора на дизеле ЗЧ 9,5/10,0 исходя из компоновочных решений.

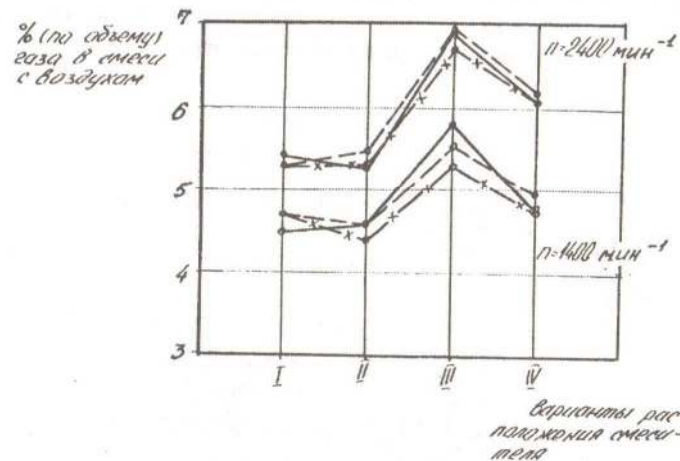


Рис. 4.4. Распределение газа (по метану) дизеля ЗЧ 9,5/10,0 в зависимости от места установки смесителя-дозатора: □—□ - 1-й цилиндр; x - x - 2-й цилиндр; ---- - 3-й цилиндр

## 4.2. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторных дизелей при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива

### 4.2.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива

Изменение эксплуатационных показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива при работе по дизельному и газодизельному процессам на частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $1400 \text{ мин}^{-1}$  представлено на рис. 4.5. Поскольку характеристика снималась для определения оптимальных значений регулировочных углов опережения впрыскивания топлива для дизельного и газодизельного процессов, то графики представлены не для равных значений средних эффективных давлений. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу установочный угол опережения впрыскивания топлива при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и по условию наилучшей экономичности не изменяется. При частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  и том же условии он будет составлять  $22^\circ$  против  $26^\circ$  при дизельном процессе. Однако при работе с углом  $26^\circ$  на частоте  $1800 \text{ мин}^{-1}$  по условию обеспечения качественного процесса сгорания возникает необходимость снижения установочного угла из-за повышения жесткости процесса сгорания. Показатели процесса сгорания дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , представлены на рис. 4.6,а. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу возрастает максимальное давление газов в цилиндре дизеля при увеличении установочного угла опережения впрыскивания топлива с  $22^\circ$  до  $30^\circ$ . Одновременно резко возрастает «жесткость» работы дизеля и при угле  $26^\circ$  превышает величину  $0,8 \text{ МПа/градус}$ , а также угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, и степень повышения давления.

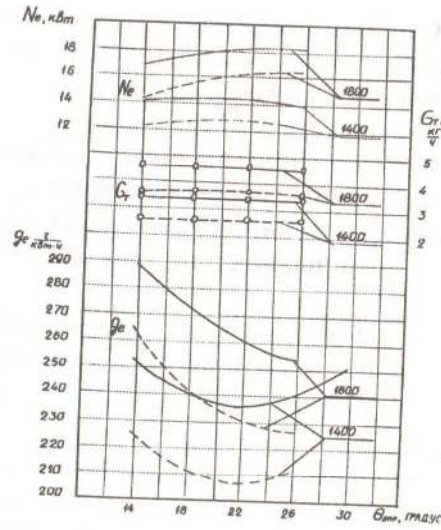
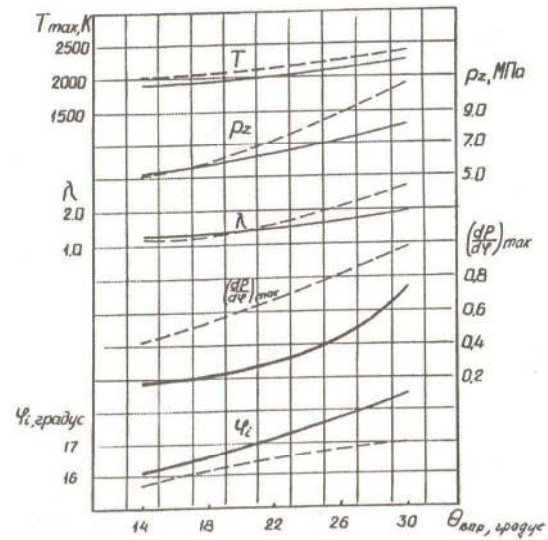
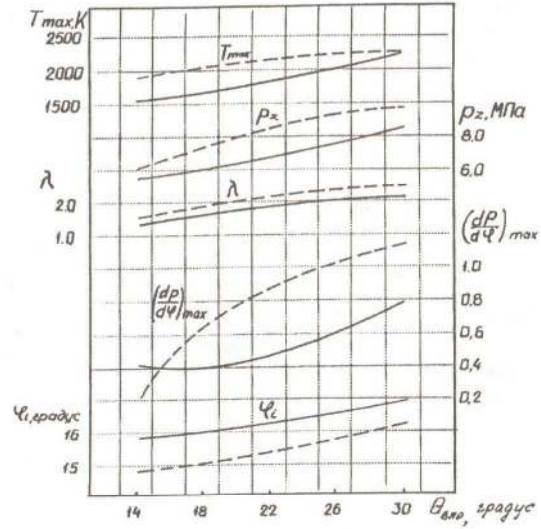


Рис. 4.5. Изменение мощностных и экономических показателей дизеля 2С 10,5/12,0 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива: □—□ - дизельный процесс; о - - - о - газодизельный процесс

Таким образом, по показателям процесса сгорания дизеля при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и работе по газодизельному процессу оптимальным установочным углом должен быть угол 22 градуса вместо 26 градусов при дизельном процессе. Показатели процесса сгорания дизеля 2С 10,5/12,0, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты 1400 мин<sup>-1</sup>, представлены на рис. 4.6,б. Из графиков видно, что закономерности изменения показателей процесса сгорания при работе по газодизельному процессу сохраняются и при частоте 1400 мин<sup>-1</sup>. Наблюдается рост максимального давления в цилиндре, степени повышения давления, жесткости работы дизеля, увеличение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. Характеристики тепловыделения дизеля при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте 1800 мин<sup>-1</sup>, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива, представлены на рис. 4.7,а. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу и увеличении установочного угла опережения впрыскивания

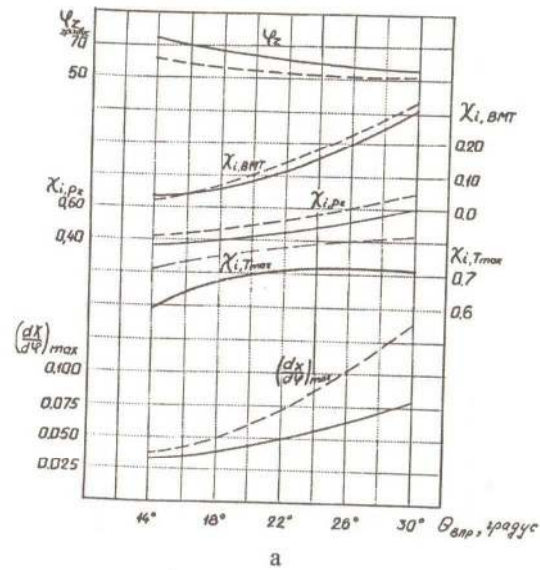


а

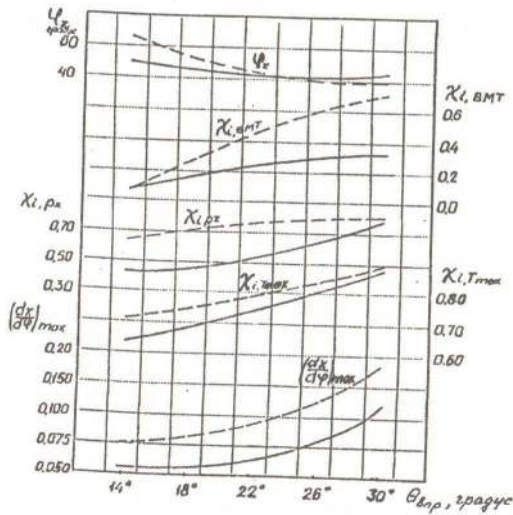


б

Рис. 4.6. Изменение показателей процесса сгорания дизеля 2С 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива: а - n = 1800 мин<sup>-1</sup>; б - n = 1400 мин<sup>-1</sup>; — - дизельный процесс; - - - газодизельный процесс



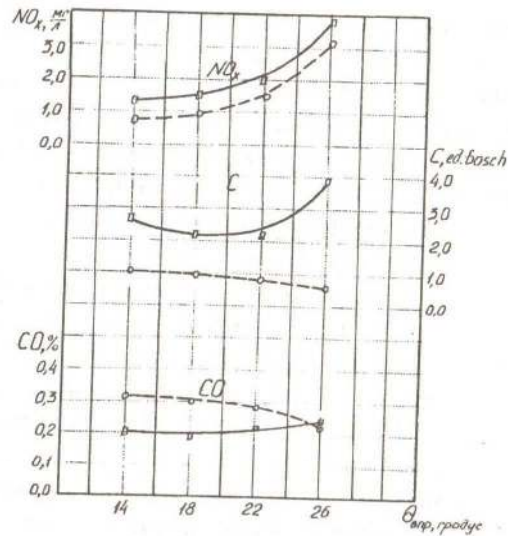
а



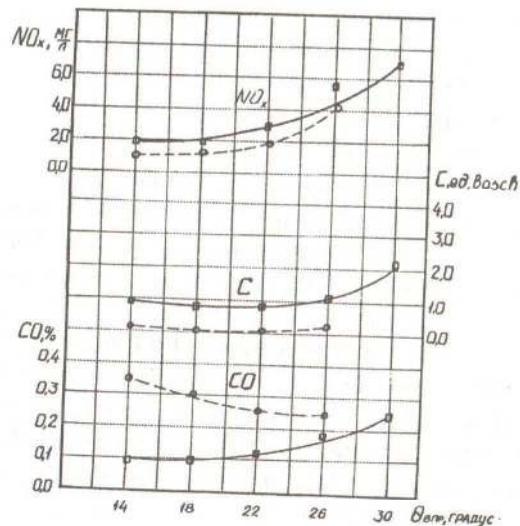
б

Рис. 4.7. Изменение характеристик тепловыделения дизеля 2С 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

топлива возрастает максимум скорости активного тепловыделения. При угле 22 градуса его величина составляет 0,075 против 0,050 при дизельном процессе, а при угле 26 градусов составляет уже 0,1. Наблюдается рост величины полезного выделения тепла при максимальном давлении газов в цилиндре, при максимальной осредненной температуре газов в цилиндре, в.м.т. Вместе с тем значение  $\varphi_z$  при увеличении угла снижается и лежит ниже значений дизельного процесса. Характеристики тепловыделения дизеля при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива, представлены на рис. 4.7,б. Характер протекания кривых на графике сохраняется и при частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$ . Значения исследуемых параметров выше при газодизельном процессе, чем при дизельном, и это увеличение возрастает при угле 26 градусов в сравнении со значениями при угле 22 градуса. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2С 10,5/12,0, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , представлено на рис. 4.8,а. Из графиков видно, что при изменении установочного угла содержание оксидов азота при работе на газе изменяется по зависимости, аналогичной зависимости дизельного процесса, т.е. при увеличении угла выход оксидов азота возрастает. Анализ содержания сажи в ОГ при работе по газодизельному процессу показывает, что при увеличении установочного угла опережения впрыскивания топлива содержание сажи не возрастает, в то время как при работе по дизельному процессу рост сажи существенно возрастает. Содержание СО в ОГ также снижается при увеличении угла, в то время как при дизельном процессе наблюдается рост выхода СО. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2С 10,5/12,0, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , представлено на рис. 4.8,б. Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ при работе по газодизельному процессу аналогичны закономерностям изменения при частоте  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .



а



б

Рис. 4.8. Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4С 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 □—□ - дизельный процесс; о---о - газодизельный процесс

Таким образом, по результатам характеристик по установочному углу опережения впрыскивания топлива, влиянию его на мощностные, экономические показатели, показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения для частот 1800 и 1400  $\text{мин}^{-1}$  был выбран в качестве оптимального для газодизельного процесса установочный угол опережения впрыскивания топлива 22 градуса до в.м.т. Для сравнения с дизельным процессом дальнейшие исследования проводились на каждом скоростном режиме на двух углах: 22 и 26 градусов.

#### 4.2.2. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторного дизеля 4С 10,5/12,0 при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива

Регулировочная характеристика по установочному углу опережения впрыскивания топлива при работе дизеля 4С 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам на частоте вращения 1800 и 1400  $\text{мин}^{-1}$  для мощностных и экономических показателей представлена на рис. 4.9.

Поскольку характеристика снималась для определения оптимальных значений регулировочных углов опережения впрыскивания топлива для дизельного и газодизельного процессов, то графики представлены не для равных значений средних эффективных давлений. Из графиков следует, что при работе по газодизельному процессу установленный угол опережения впрыскивания топлива при частоте вращения 1800  $\text{мин}^{-1}$  и по условию наилучшей экономичности не изменяется. При частоте вращения 1400  $\text{мин}^{-1}$  и тех же условиях он будет составлять 22 градуса против 26 градусов при частоте вращения 1800  $\text{мин}^{-1}$ . Однако при работе с углом  $\theta_{\text{впр.}} = 26$  градусов на частоте вращения 1800  $\text{мин}^{-1}$  по условиям обеспечения качественного процесса сгорания возникает необходимость снижения установочного угла из-за повышения жесткости процесса сгорания.

Показатели процесса сгорания дизеля 4С 10,5/12,0, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения 1800  $\text{мин}^{-1}$ , представлены на рис. 4.10,а. Из графиков следует, что при работе по газодизельному процессу возрас-

тает максимальное давление сгорания в цилиндре дизеля при увеличении установочного угла опережения впрыскивания топлива. Одновременно резко возрастает жесткость работы дизеля, и при угле 26 градусов достигает величины 0,8 МПа/градус, а также угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, и степень повышения давления. Таким образом, по показателям процесса сгорания дизеля при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и работе по газодизельному процессу оптимальным установочным углом, по соображениям снижения жесткости, следует считать угол 22 градуса вместо 26 градусов для дизельного процесса.

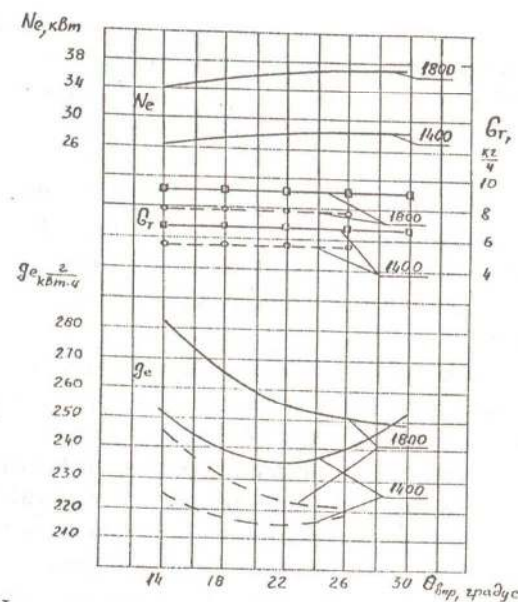
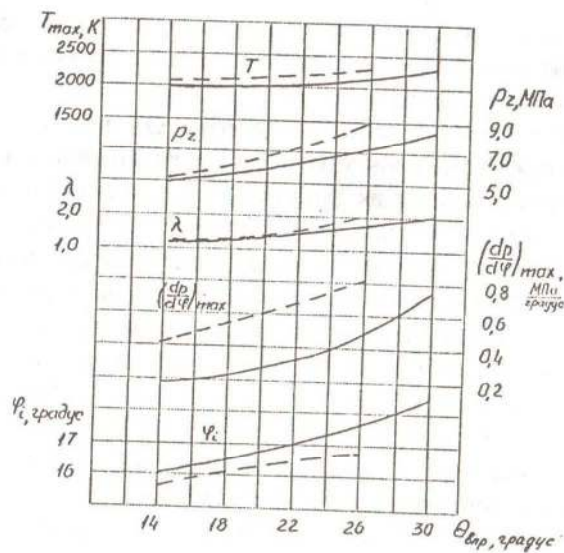


Рис. 4.9. Изменение мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 10,5/12,0 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива: □—□ - дизельный процесс; о---о - газодизельный процесс

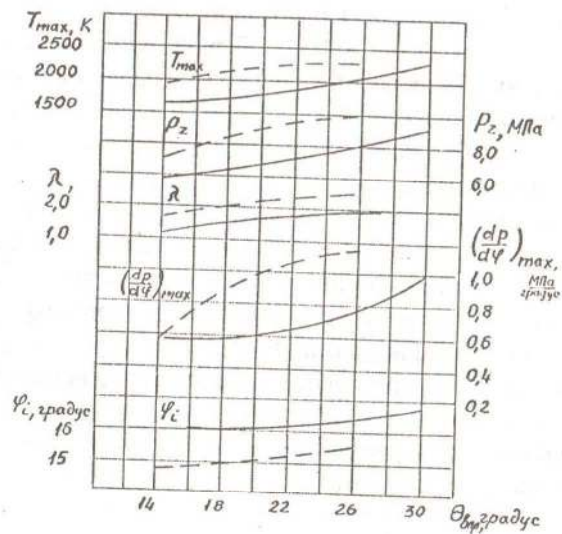
Показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 10,5/12,0, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения 1400 мин<sup>-1</sup>, представлены на рис. 4.10,б. Из графиков следует, что закономерности изменения показателей процесса сгорания при работе по газодизельному процессу сохраняются и для частоты вращения 1400 мин<sup>-1</sup>: наблюдается рост максимального

давления сгорания в цилиндре, степени повышения давления, жесткости работы дизеля, увеличение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения 1800 мин<sup>-1</sup>, представлено на рис. 4.11,а. Из графиков видно, что при изменении установочного угла содержание оксидов азота при работе на газе изменяется. При увеличении угла выход оксидов азота возрастает. Анализ содержания сажи в ОГ при работе по газодизельному процессу показывает, что при увеличении установочного угла опережения впрыскивания топлива содержание сажи не возрастает, в то время как при работе по дизельному процессу ее концентрация существенно возрастает. Газодизельный процесс сопровождается увеличением выбросов суммарных углеводородов - их содержание в ОГ выше в 4...5 раз по сравнению с дизельным процессом, изменение же концентрации  $CH_x$ , в зависимости от угла опережения впрыскивания топлива, незначительно для обоих процессов. Содержание в ОГ  $CO$  при работе по газодизельному циклу выше в 1,3...1,5 раза, чем при работе по дизельному, и в обоих случаях несколько уменьшается с увеличением угла опережения впрыскивания топлива. При работе на газе меньше содержание в ОГ  $CO_2$  во всем диапазоне изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива, причем с его возрастанием незначительно увеличивается и концентрация  $CO_2$  в противовес увеличению оксида углерода. Содержание токсичных компонентов в ОГ при работе по газодизельному процессу, в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> для дизеля 4Ч 10,5/12,0, представлено на рис. 4.11,б. При этом основные закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ аналогичны закономерностям при частоте 1800 мин<sup>-1</sup>, исключая содержание  $CO$ , концентрация которого в ОГ в данном случае растет.

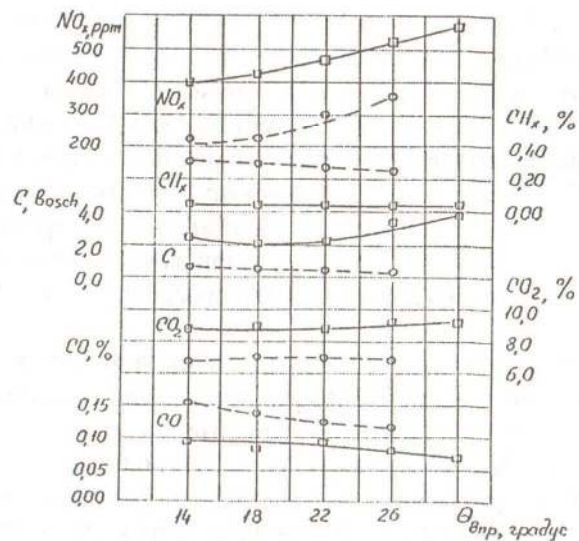


а

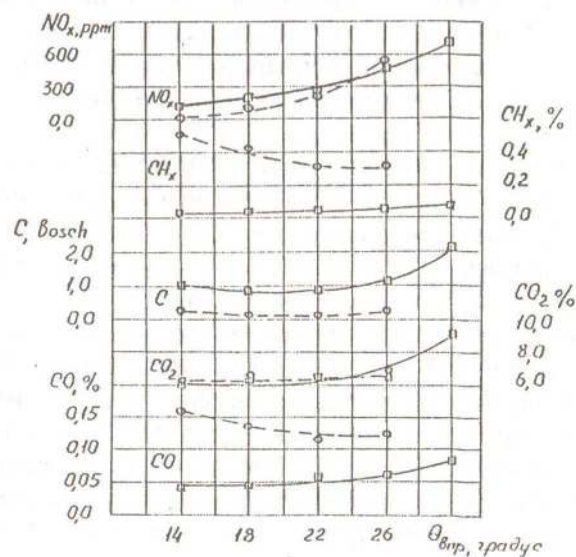


б

Рис. 4.10. Изменение показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; — - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс



а



б

Рис. 4.11. Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; □ - дизельный процесс; о - - - о - газодизельный процесс



Таким образом, по результатам регулировочных характеристик по установочному углу опережения впрыскивания топлива, влиянию его на мощностные, экономические показатели, параметры процесса сгорания для частот вращения 1800 и 1400 мин<sup>-1</sup> был выбран в качестве оптимального для газодизельного процесса установочный угол опережения впрыскивания топлива 22 градуса до верхней мертвой точки. Поскольку двигатель не имеет какого-либо устройства для быстрого изменения установочного угла, это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

### **4.3. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторных дизелей**

#### **4.3.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0**

##### **4.3.1.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 на различных нагрузочных режимах**

Индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по газодизельному и дизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов, частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и номинальной нагрузке представлены на рис. 4.12,а. Из графика видно, что при работе по газодизельному процессу сокращается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, значительно возрастает максимальное давление в цилиндре. Если для дизельного процесса максимальное давление в цилиндре составляет 7,2 МПа, то при газодизельном процессе уже 8,7 МПа. Угол наклона кривой давления увеличивается, что свидетельствует о возрастающей жесткости процесса сгорания. На линии расширения кривая давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса. Индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по газодизельному и дизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса) и частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и номинальной нагрузке представлены на рис. 4.12,б. Для

этого графика в соответствии с измененным установочным углом характерно меньшее максимальное давление в цилиндре, меньшая жесткость процесса, смещение точки максимального давления в цилиндре вправо от в.м.т. по сравнению с предыдущим графиком. При газодизельном процессе также сокращается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, возрастает максимальное давление в цилиндре. Индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по газодизельному и дизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса) и частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 4.13,а. Индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по газодизельному и дизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса) и частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 4.13,б. Общие закономерности изменения кривой давления, в зависимости от угла поворота коленчатого вала, рассмотренные для частоты 1800 мин<sup>-1</sup>, характерны и для этого режима. При переходе на газодизельный процесс повышаются максимальное давление в цилиндре, жесткость процесса сгорания, уменьшается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при расширении кривая давления газов при газодизельном процессе лежит ниже аналогичной кривой дизельного процесса. Графики динамики выделения тепла, осредненной температуры газов в цилиндре, скорости отвода тепла и полезного выделения тепла в функции угла поворота коленчатого вала дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 1800 мин<sup>-1</sup>, установочного угла опережения впрыскивания топлива 26 градусов и номинальной нагрузке представлены на рис. 4.14,а. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу резко увеличивается (почти в два раза) скорость активного выделения тепла, изменяется характер протекания кривых скорости отвода тепла и полезного выделения тепла. Для газодизельного процесса характерно увеличение осредненной температуры газов в цилиндре, смещение максимального значения в сторону в.м.т.

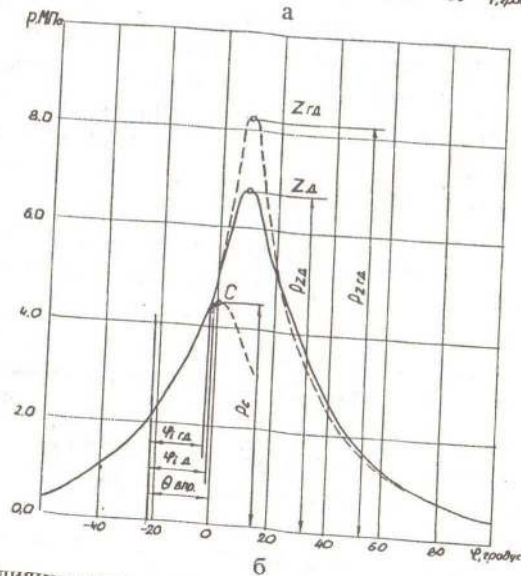
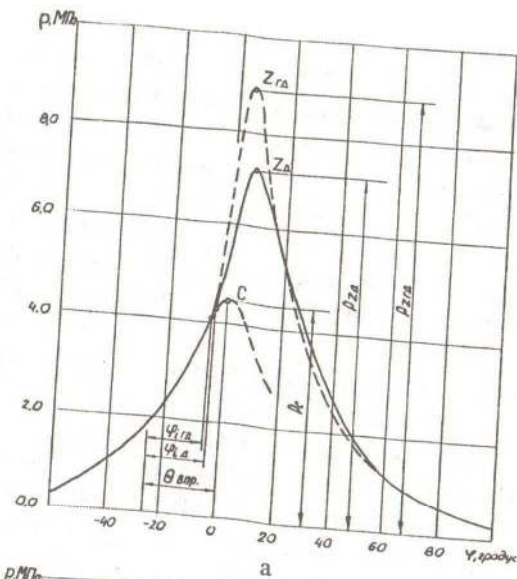


Рис. 4.12. Влияние применения природного газа на индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ;  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ ; б -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ ; — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , установочного угла  $22$  градуса (оптимальном для газодизельного процесса) и номинальной нагрузке, представлены на рис. 4.14,б. По сравнению с предыдущим графиком снижается динамика выделения тепла при газодизельном процессе, а характер протекания остальных кривых остается прежним.

Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , установочного угла  $26$  градусов (оптимального для дизельного процесса), представлены на рис. 4.15,а, а для установочного угла опережения впрыскивания топлива  $22$  градуса (оптимального для газодизельного процесса) представлены на рис. 4.15,б. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу увеличивается динамика выделения тепла, изменяется характер протекания скорости отвода тепла и полезного выделения тепла. Для газодизельного процесса характерно увеличение осредненной температуры газов в цилиндре, смещение максимального значения в сторону в.м.т.

Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период, при работе по газодизельному процессу, приводит к снижению доли потерь тепла в этот период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование тепла в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива. Показатели процесса сгорания дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам, в зависимости от нагрузки для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочного угла  $26$  градусов (оптимального для дизельного процесса), представлены на рис. 4.16,а. Из графиков видно, что максимальное давление газов в цилиндре дизеля и степень повышения давления при газодизельном процессе выше, чем при дизельном во всем диапазоне изменения нагрузок. Максимальная осредненная температура газов в цилиндре при газодизельном процессе превышает значения дизельного процесса при значениях среднего эффективного давления выше  $0,2 \text{ МПа}$ .

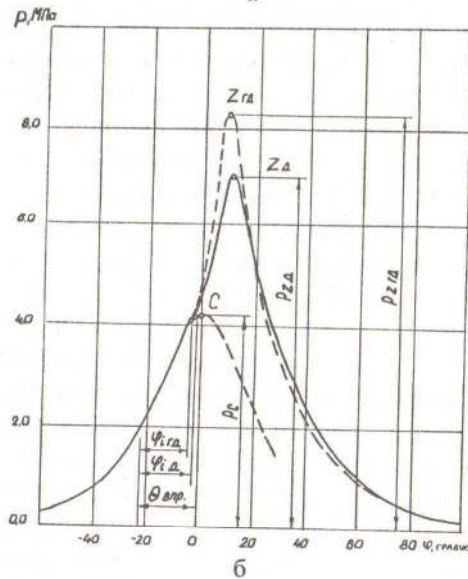
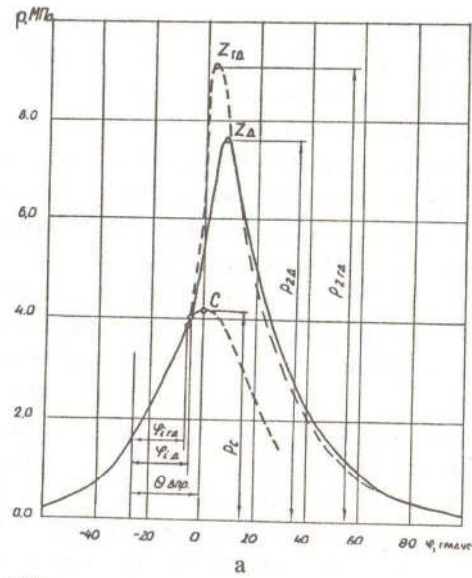


Рис. 4.13. Влияние применения природного газа на индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ;  $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ ; — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

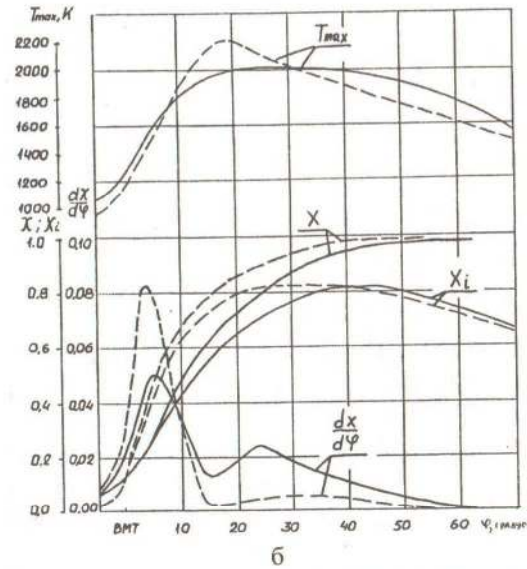
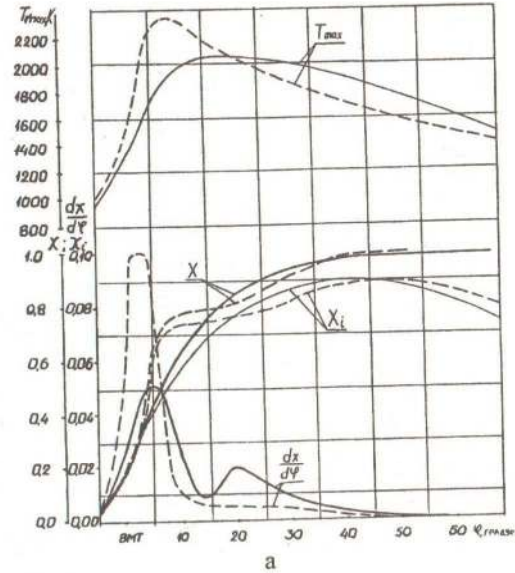


Рис. 4.14. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,58 \text{ МПа}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ; — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

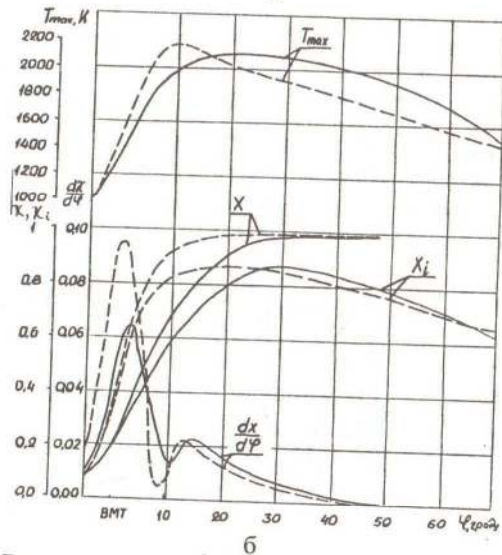
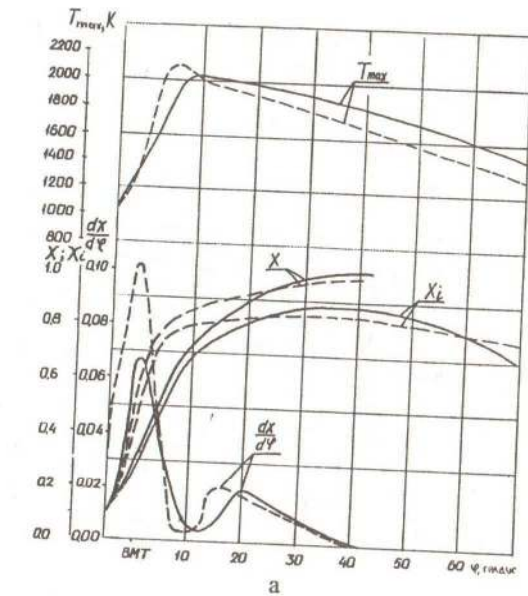
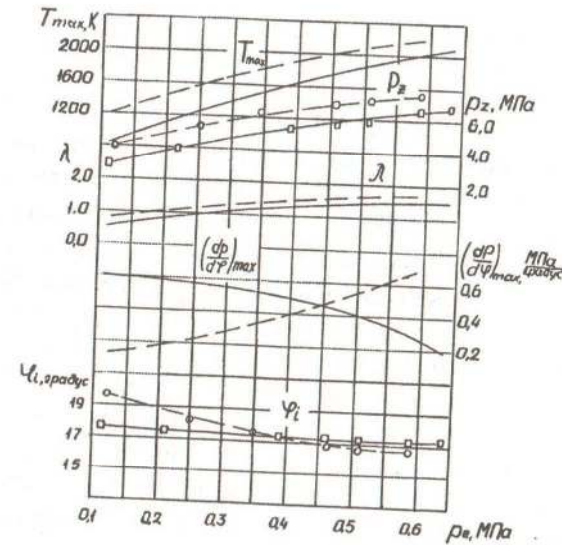


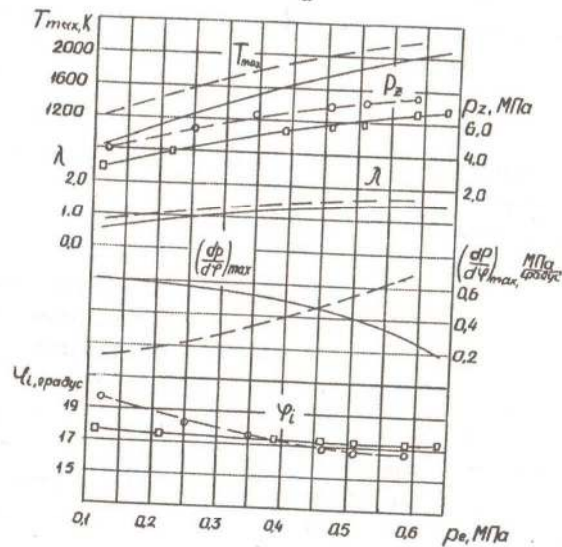
Рис. 4.15. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения дизеля 2С 10,5/12,0 при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ :  
 а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ; — дизельный процесс;  
 ---- газодизельный процесс

Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения при газодизельном процессе больше, чем при дизельном до значений среднего эффективного давления 0,34 МПа, при больших же значениях нагрузки его величина при газодизельном процессе снижается. Изменение жесткости процесса сгорания при увеличении нагрузки при газодизельном процессе прямо противоположно изменению жесткости дизельного процесса. Если при дизельном процессе жесткость процесса сгорания снижается с максимального значения на минимальной нагрузке (0,9 МПа/градус при среднем эффективном давлении 0,1 МПа) до минимального значения при максимальной нагрузке (0,36 МПа/градус при среднем эффективном давлении 0,64 МПа), то при газодизельном процессе жесткость процесса сгорания увеличивается при увеличении нагрузки. Так, если при среднем эффективном давлении 0,1 МПа жесткость процесса сгорания составляет 0,18 МПа/градус, то при нагрузке 0,58 МПа жесткость составляет уже 0,82 МПа/градус. Показатели процесса сгорания дизеля 2С 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам, в зависимости от нагрузки для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле  $22^\circ$  (оптимального для газодизельного процесса), представлены на рис. 4.16,б. Из графиков видно, что общие закономерности изменения показателей процесса сгорания, в зависимости от нагрузки, сохранились и для установочного угла опережения впрыскивания топлива  $22^\circ$ .

На этом режиме при газодизельном процессе увеличилась максимальная осредненная температура газов в цилиндре во всем диапазоне нагрузок. Степень повышения давления хотя и выше при газодизельном процессе, но по сравнению с предыдущим графиком (см. рис. 4.16,а) имеет меньшие значения. Характеристики тепловыделения дизеля 2С 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $26^\circ$  (оптимальном для дизельного процесса), в зависимости от изменения нагрузки, представлены на рис. 4.17,а. Из графиков видно, что при газодизельном процессе характеристики тепловыделения несколько отличные от характеристик дизельного процесса.



а



б

Рис. 4.16. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в зависимости от нагрузки дизеля 2Ч 10,5/12,0 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :  
 а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square$  - дизельный процесс;  
 $\circ$  - газодизельный процесс

Так, если при дизельном процессе максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается с 0,08 при среднем эффективном давлении 0,1 МПа до 0,05 при 0,64 МПа, то при газодизельном процессе увеличивается с 0,06 при 0,1 МПа до 0,11 при среднем эффективном давлении 0,58 МПа. Таким образом, до нагрузки 0,325 МПа максимум скорости активного тепловыделения дизельного процесса выше, чем газодизельного, а при большей нагрузке становится меньше, чем у газодизельного процесса. Такая же картина наблюдается и для значений активного выделения тепла в в.м.т., при максимальном давлении в цилиндре, при максимальной осредненной температуре в цилиндре. До значения среднего эффективного давления в цилиндре 0,375 МПа эти кривые при дизельном процессе лежат выше кривых газодизельного процесса, при давлении 0,375 МПа выравниваются, а при увеличении нагрузки лежат ниже аналогичных кривых газодизельного процесса. Значения  $\phi_z$  дизельного процесса лежат выше значений газодизельного процесса во всем диапазоне изменения нагрузки. Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса), в зависимости от изменения нагрузки, представлены на рис. 4.17,б. В целом характер изменения кривых при увеличении нагрузки при дизельном и газодизельном процессах не изменился и повторяет в основном характер кривых, рассмотренных выше на рис. 4.17,а. Вместе с тем необходимо отметить, что максимум скорости активного тепловыделения при газодизельном процессе ниже максимума скорости при дизельном процессе до среднего эффективного давления 0,5 МПа. При давлении 0,5 МПа скорости равны и при дальнейшем увеличении нагрузки максимум скорости активного тепловыделения газодизельного процесса выше аналогичной кривой дизельного процесса. Показатели процесса сгорания дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам, в зависимости от нагрузки для частоты  $1400 \text{ мин}^{-1}$  и установочного угла опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимального для дизельного процесса), представлены на рис. 4.18,а.

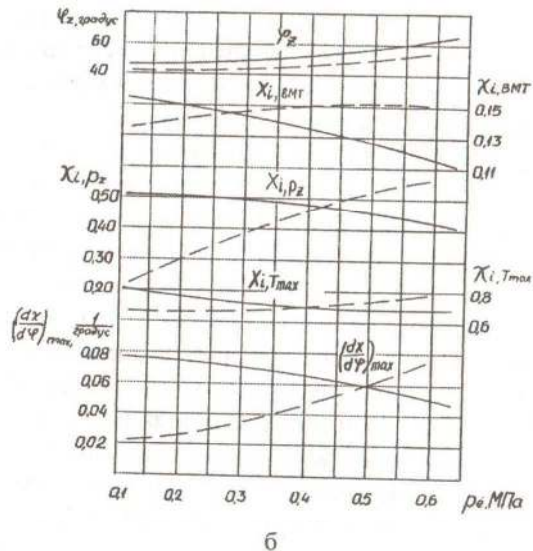
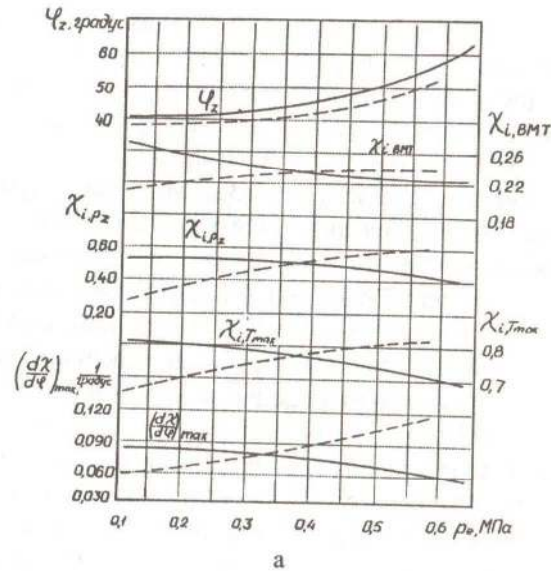


Рис. 4.17. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в зависимости от нагрузки дизеля 2С 10,5/12,0 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ; — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

Из графиков видно, что при газодизельном процессе сокращается величина угла, соответствующая периоду задержки воспламенения во всем диапазоне нагрузок. Максимальное давление в цилиндре при газодизельном процессе ниже, чем при дизельном до среднего эффективного давления 0,42 МПа. При дальнейшем увеличении нагрузки максимальное давление в цилиндре при газодизельном процессе выше, чем при дизельном. Аналогичная картина наблюдается и для максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, степени повышения давления и максимальной жесткости процесса сгорания. Так, максимальная осредненная температура газов в цилиндре при газодизельном процессе ниже значений дизельного процесса до нагрузки 0,37 МПа, а при дальнейшем увеличении нагрузки превышает значения дизельного процесса. Степень повышения давления при газодизельном процессе ниже значений дизельного процесса до нагрузки 0,525 МПа, так же как и у максимальной жесткости процесса сгорания. При дальнейшем увеличении нагрузки степень повышения давления и максимальная жесткость процесса сгорания газодизельного процесса выше, чем у дизельного.

Показатели процесса сгорания дизеля 2С 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам, в зависимости от нагрузки для частоты вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  и установочного угла опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимального для газодизельного процесса), представлены на рис. 4.18,б. Из графиков видно, что в целом характер изменения кривых сохраняется и на этом установочном угле. Максимальная осредненная температура газов в цилиндре при газодизельном процессе выше, чем при дизельном во всем диапазоне изменения нагрузки, максимальное давление в цилиндре при нагрузке более 0,35 МПа выше у газодизельного процесса, так же как и степень повышения давления. Максимальная жесткость процесса сгорания при газодизельном процессе до нагрузки 0,55 МПа ниже, чем у дизельного процесса, а при большей нагрузке превышает жесткость дизельного процесса. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения при газодизельном процессе, уменьшается по сравнению с дизельным процессом при нагрузке выше 0,35 МПа.

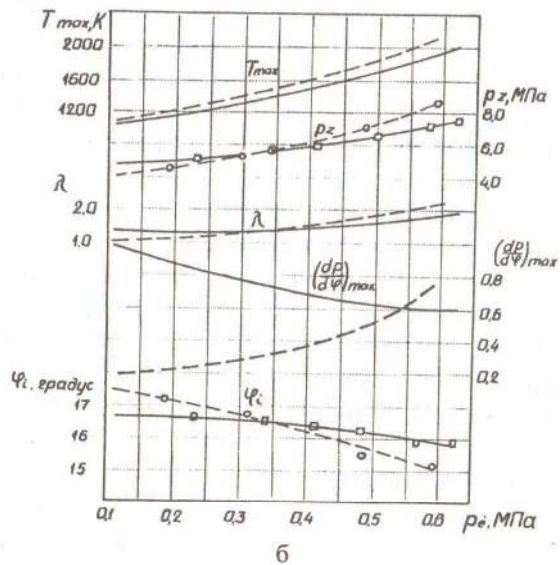
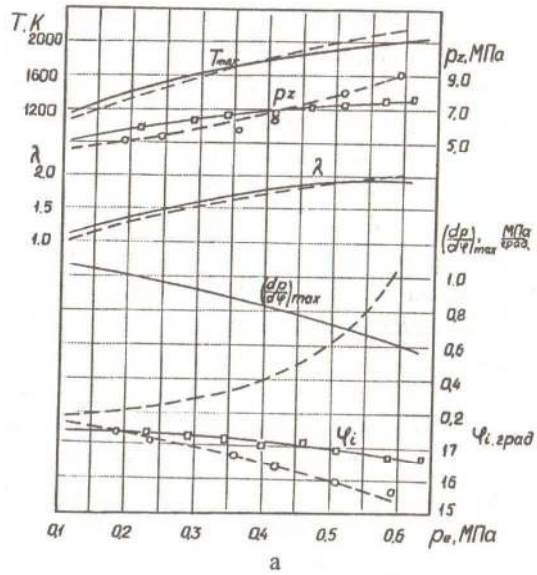


Рис. 4.18. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в зависимости от нагрузки дизеля 2Ч 10,5/12,0 при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  $\circ - \circ$  - газодизельный процесс

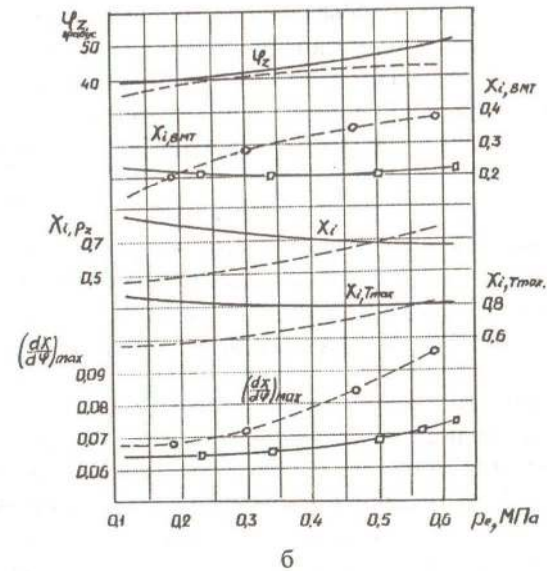
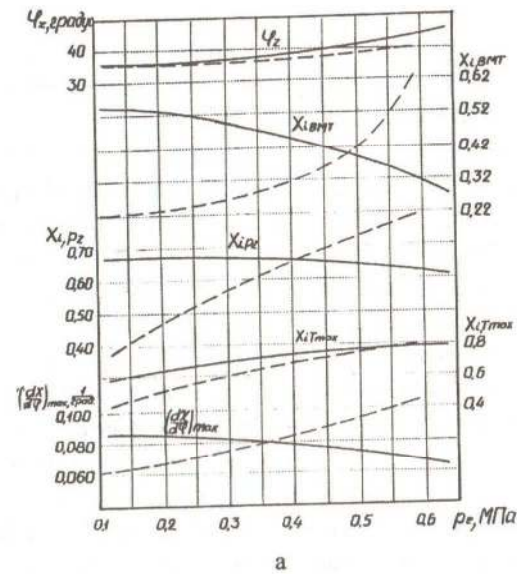


Рис. 4.19. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в зависимости от нагрузки дизеля 2Ч 10,5/12,0 при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  $\circ - \circ$  - газодизельный процесс

Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса), в зависимости от изменения нагрузки, представлены на рис. 4.19,а. Из графиков видно, что при газодизельном процессе характеристики тепловыделения отличаются от характеристик тепловыделения дизельного процесса. Так, если при дизельном процессе максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается, то при газодизельном процессе - увеличивается. Значения активного выделения тепла в в.м.т. при максимальном давлении в цилиндре изменяются аналогичным образом. Так, если при дизельном процессе эти значения при увеличении нагрузки снижаются, то при газодизельном процессе - возрастают. При газодизельном процессе  $\varphi_z$  лежит ниже значений при дизельном процессе. Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса, в зависимости от изменения нагрузки, представлены на рис. 4.19,б. Из графиков видно, что максимум скорости активного тепловыделения при газодизельном процессе лежит выше аналогичных значений дизельного процесса. Это характерно также и для активного выделения тепла в в.м.т.

#### 4.3.1.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения

Показатели процесса сгорания дизеля при работе по дизельному и газодизельному процессам, установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса), в зависимости от частоты вращения, представлены на рис. 4.20,а. Из графиков видно, что все показатели процесса сгорания при газодизельном процессе, кроме угла, соответствующего периоду задержки воспламенения, лежат выше показателей дизельного процесса во всем диапазоне частот вращения.

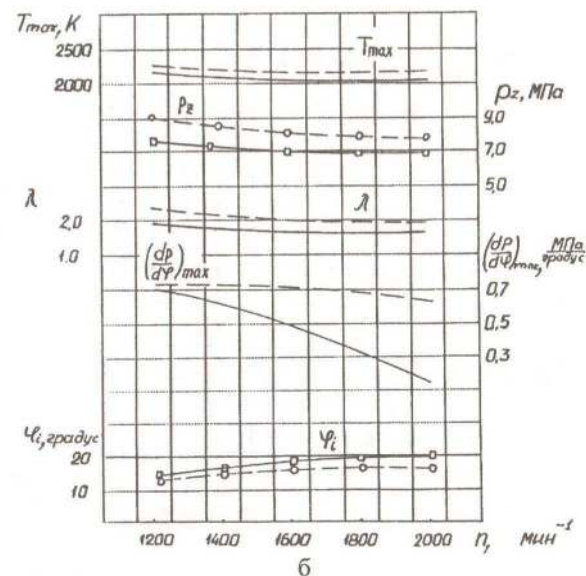
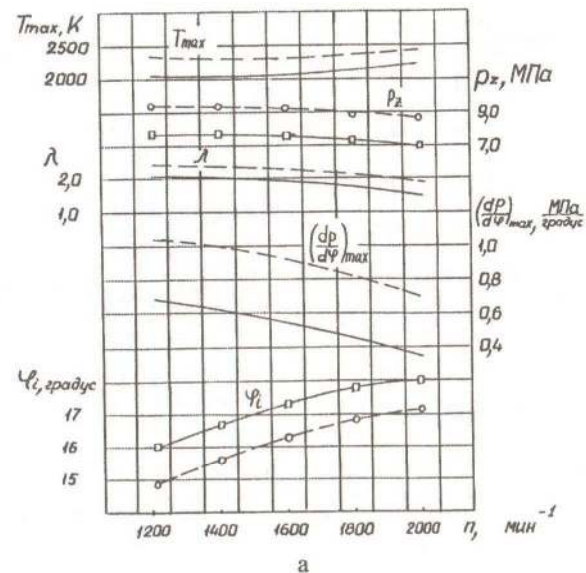
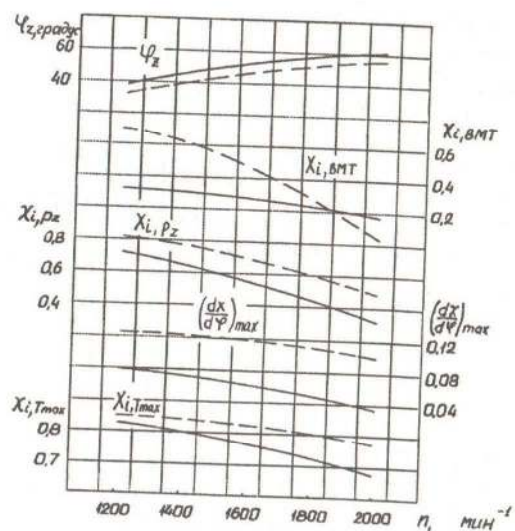
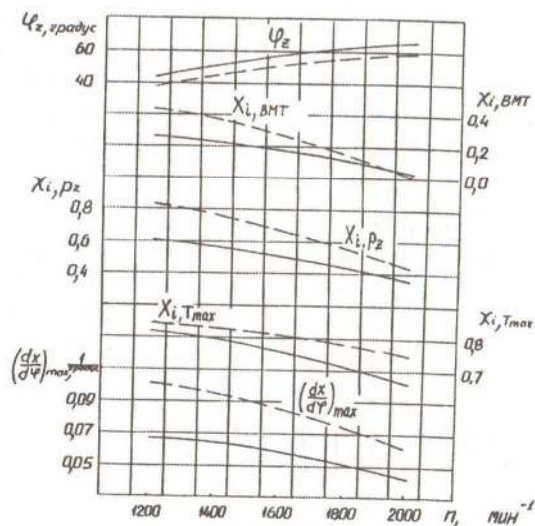


Рис. 4.20. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в зависимости от частоты вращения дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{впр} = 22^\circ$ ;  $\square$ — $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  - - -  $\circ$  - газодизельный процесс





а



б

Рис. 4.21. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в зависимости от частоты вращения дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{впр} = 22^\circ$ ; — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

Характер изменения всех показателей при газодизельном процессе, в зависимости от частоты вращения, полностью повторяет характер изменения при дизельном процессе. Показатели процесса сгорания дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам, установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса), в зависимости от частоты вращения, представлены на рис. 4.20,б. Характер изменения показателей процесса сгорания такой же, что и при установочном угле 26 градусов. Отличительным является то, что жесткость процесса сгорания при дизельном процессе при увеличении частоты вращения снижается быстрее, чем у газодизельного процесса. Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам для установочного угла опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса), в зависимости от частоты вращения, представлены на рис. 4.21,а. Характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам для установочного угла опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса), в зависимости от частоты вращения, представлены на рис. 4.21,б. Из графиков видно, что скорость активного тепловыделения при газодизельном процессе выше, чем у дизельного процесса на обоих установочных углах и во всем скоростном диапазоне. Это характерно и для активного тепловыделения в характерных точках, максимальном давлении в цилиндре; максимальной осредненной температуре газов в цилиндре, в.м.т. Только  $\phi_z$  при газодизельном меньше, чем при дизельном процессе во всем диапазоне частот вращения на обоих установочных углах.

#### 4.3.2. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели и характеристики тепловыделения тракторного дизеля 4Ч 10,5/12,0

Индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе на сжатом природном газе и по дизельному процессу при установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса, частоте вращения 1800  $\text{мин}^{-1}$  и номинальной нагрузке  $p_c = 0,61$  МПа пред-

ставлены на рис. 4.22,а. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу сокращается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, значительно возрастает максимальное давление сгорания. Если для дизельного процесса максимальное давление в цилиндре составляет 6,8 МПа, то при газодизельном процессе - 7,4 МПа. Угол наклона кривой давления увеличивается, что свидетельствует о возрастающей жесткости процесса сгорания - максимальная скорость нарастания давления возрастает до  $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,68$  МПа/градус. На линии расширения кривая давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе по газодизельному и дизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{\text{впр}} = 22$  градуса и частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 4.22,б. Общие закономерности изменения кривой давления в зависимости от угла поворота коленчатого вала дизеля 4Ч 10,5/12,0, рассмотренные для частоты  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , характерны и для этого режима. При переходе на газодизельный процесс повышаются максимальное давление сгорания в цилиндре, жесткость, уменьшается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при расширении кривая давления газов при газодизельном процессе лежит ниже аналогичной кривой дизельного процесса. Графики динамики выделения тепла, осредненной температуры газов в цилиндре, скорости отвода теплоты и полезного выделения теплоты в функции угла поворота коленчатого вала дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , установочного угла опережения впрыскивания топлива  $22$  градуса и номинальной нагрузки представлены на рис. 4.23,а. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу значительно увеличивается скорость активного тепловыделения, изменяется характер протекания кривых скорости отвода тепла и полезного выделения тепла. Для газодизельного процесса характерны увеличение максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, смещение максимального ее значения в сторону в.м.т.

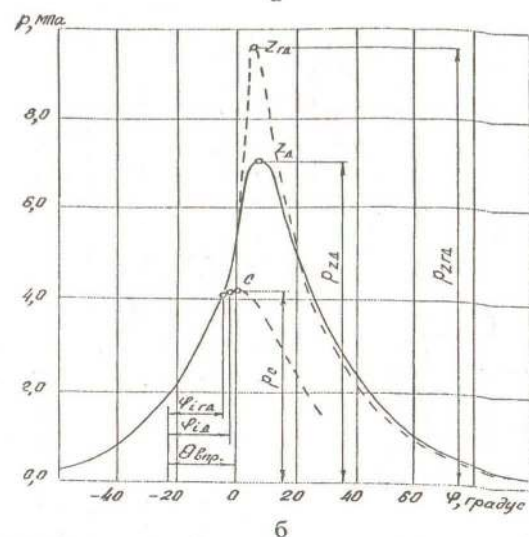
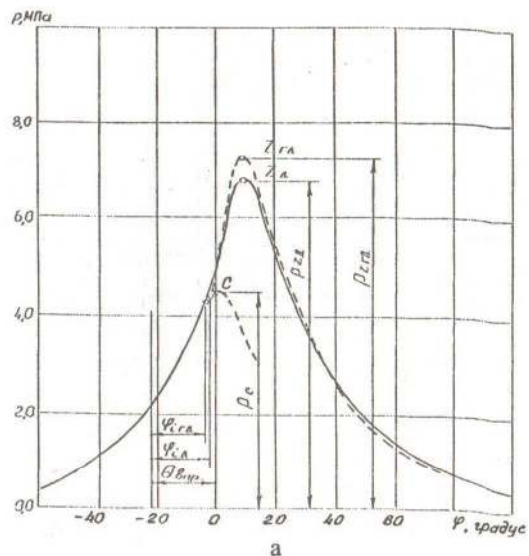
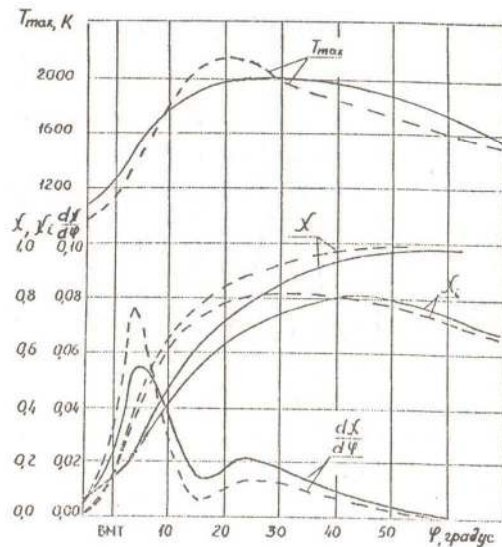
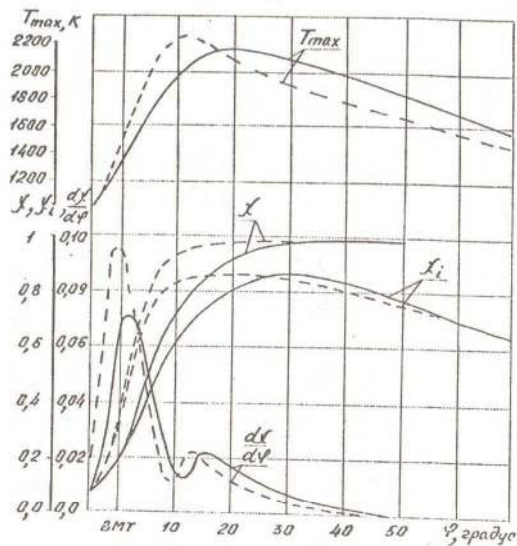


Рис. 4.22. Влияние применения природного газа на индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 10,5/12,0: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_c = 0,61 \text{ МПа}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_c = 0,68 \text{ МПа}$ ; — - дизельный процесс; - - - газодизельный процесс



а



б

Рис. 4.23. Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения дизеля 4С 10,5/12,0: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_e = 0,61 \text{ МПа}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $p_e = 0,68 \text{ МПа}$ ;  
— дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

Характеристики тепловыделения дизеля 4С 10,5/12,0, в зависимости от угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , установочного угла  $22^\circ$  и номинальной нагрузке, представлены на рис. 4.23,б. Из графиков следует, что для этой частоты вращения характерны такие же изменения в показателях тепловыделения, как и для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период при работе по газодизельному процессу приводит к снижению доли потерь тепла в начальный период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование тепла в цилиндре дизеля в начальный период. Что в конечном счете повышает и эффективный к.п.д. в целом.

#### 4.4. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа

##### 4.4.1. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 2С 10,5/12,0 на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 2С 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для дизельного процесса установочном угле опережения впрыскивания топлива  $26^\circ$ , в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , представлены на рис. 4.24,а. Из графиков видно, что величина запального (дизельного) топлива не изменялась и составляла  $0,9 \text{ кг/ч}$ , или  $20\%$  к расходу при дизельном процессе. Эффективный к.п.д. при работе на газе снижается с  $0,33$  до  $0,27$ . Снижается температура ОГ. Так, на номинальной нагрузке температура ОГ снижается с  $550^\circ\text{C}$  до  $470^\circ\text{C}$  при переходе с дизельного на газодизельный процесс. Во всем диапазоне нагрузок снижается значение коэффициента избытка воздуха при работе по газодизельному процессу, что свидетельствует об улучшении использования воздуха, поступивше-

го в цилиндры. Расход воздуха дизелем при различных вариантах работы практически лежит на одном уровне. Нагрузочная характеристика работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса представлена на рис. 4.24,б.

Из графиков видно, что общая картина изменения показателей работы дизеля не изменилась, однако повысился эффективный к.п.д. при работе на номинальном режиме по газодизельному процессу до 0,31 против 0,27 при угле 26 градусов. При газодизельном процессе повысился также коэффициент избытка воздуха.

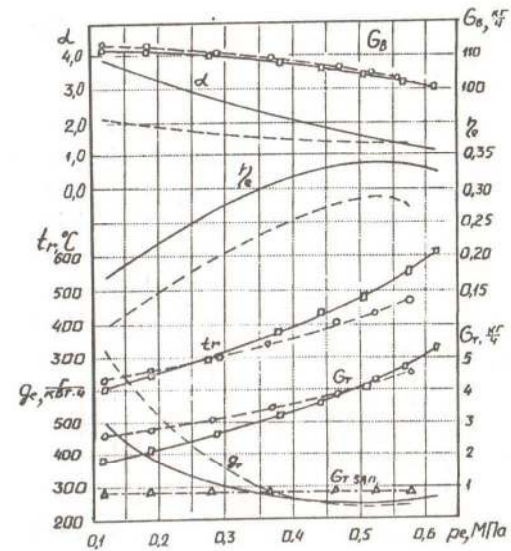
Нагрузочная характеристика дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса) при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> представлена на рис. 4.25,а.

Нагрузочная характеристика дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному процессу и газодизельному процессу на установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса) при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> представлена на рис. 4.25,б.

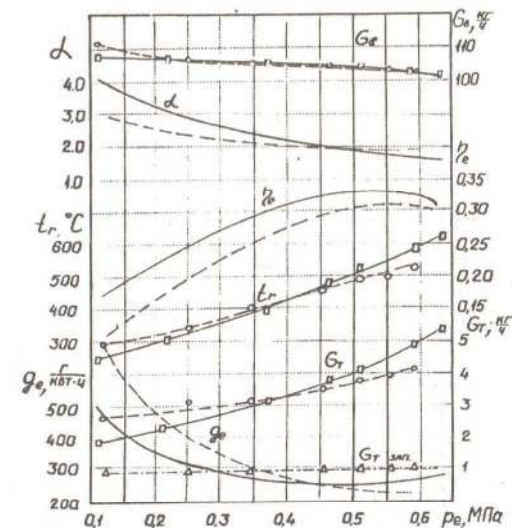
Из графиков видно, что в обоих случаях величина расхода ДТ, используемого в качестве запального, составляет около 1 кг/ч. При работе по газодизельному процессу на установочном угле 22 градуса растет также эффективный к.п.д., особенно в диапазоне нагрузок выше 0,45 МПа.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса) в функции от частоты вращения представлены на рис. 4.26,а.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса

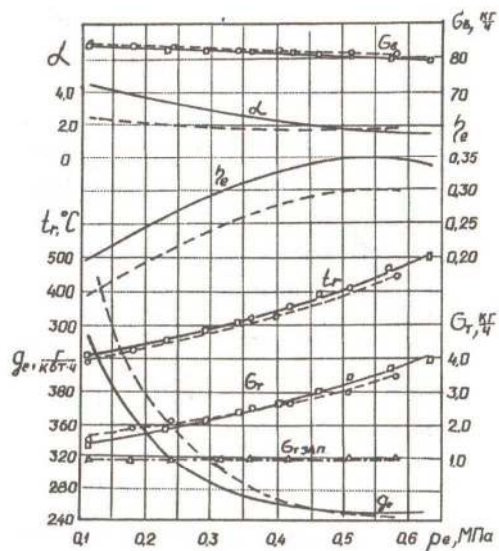


а

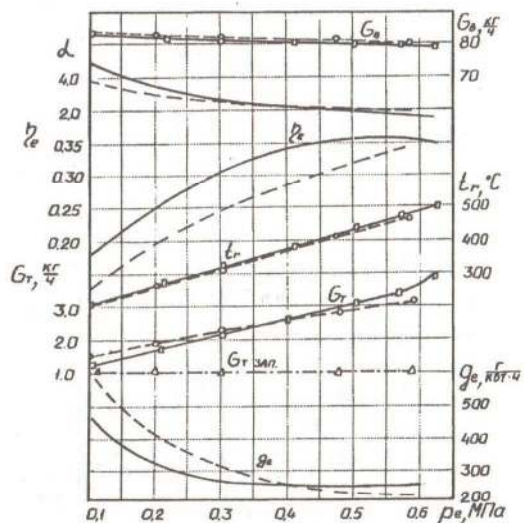


б

Рис. 4.24. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  $o - - - o$  - газодизельный процесс;  $\Delta - - - \Delta$  - расход запального ДТ



а

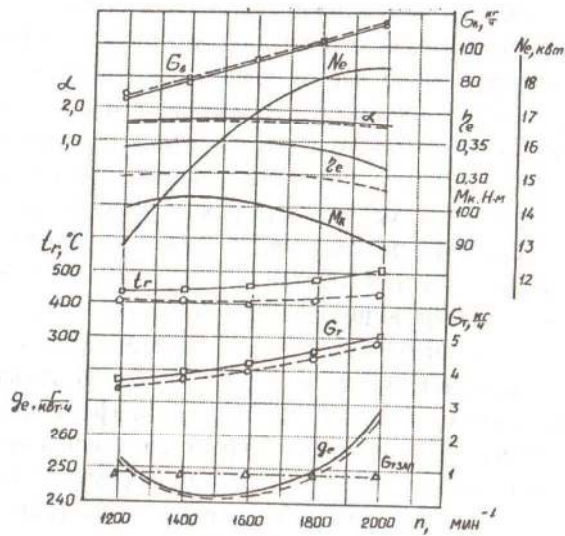


б

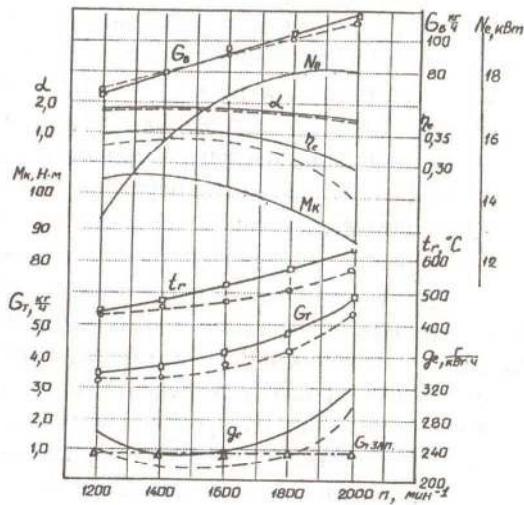
Рис. 4.25. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  $o - - - o$  - газодизельный процесс;  $\Delta - - - \Delta$  - расход запального ДТ

в функции от частоты вращения представлены на рис. 4.26,б. Из графиков видно, что при равных значениях мощности и крутящего момента во всем диапазоне частот вращения суммарный удельный эффективный расход топлива на газодизельном процессе меньше, чем при дизельном. Снижается также и суммарный часовой расход топлива. Во всем диапазоне частот вращения меньше температура ОГ. На максимальном скоростном режиме снижение составляет  $80...85^\circ\text{C}$ . Значения эффективного к.п.д. ниже на газодизельном процессе, причем при частоте  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и выше, его значения ниже 0,3. Снижается также коэффициент избытка воздуха. Величина доли запального топлива не изменялась при изменении частоты вращения и была для обеих характеристик менее  $1 \text{ кг/ч}$ . При установочном угле опережения впрыскивания топлива  $22$  градуса эффект по снижению суммарного удельного эффективного расхода топлива при работе по газодизельному процессу везде выше. Одновременно возрастает и эффективный к.п.д. В диапазоне частот вращения  $1200...1800 \text{ мин}^{-1}$  его значения хотя и ниже значений эффективного к.п.д. при дизельном процессе, но выше, чем при установочном угле опережения впрыскивания топлива  $26$  градусов и газодизельном процессе.

Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $26$  градусов (оптимальном для дизельного процесса), представлено на рис. 4.27,а. Из графиков видно, что содержание оксидов азота в ОГ при работе по газодизельному процессу ниже, чем по дизельному во всем диапазоне нагрузок. Существенно снижается содержание в ОГ сажи при работе по газодизельному процессу. Эффект значителен особенно в диапазоне нагрузок выше  $0,35 \text{ МПа}$ . Так, при среднем эффективном давлении в  $0,57 \text{ МПа}$  содержание сажи в ОГ при работе по дизельному процессу составляет  $4,0$  ед. по шкале Боша, а при работе по газодизельному процессу всего  $0,6$  ед. по шкале Боша. Вместе с тем необходимо отметить, что при работе по газодизельному процессу возрастает содержание СО в ОГ, особенно на малых нагрузках. Так, при среднем эффективном давлении  $0,1 \text{ МПа}$  содержание СО в ОГ составляет  $1,0\%$  при работе по газодизельному процессу, в то время как по дизельному - всего  $0,08\%$ .

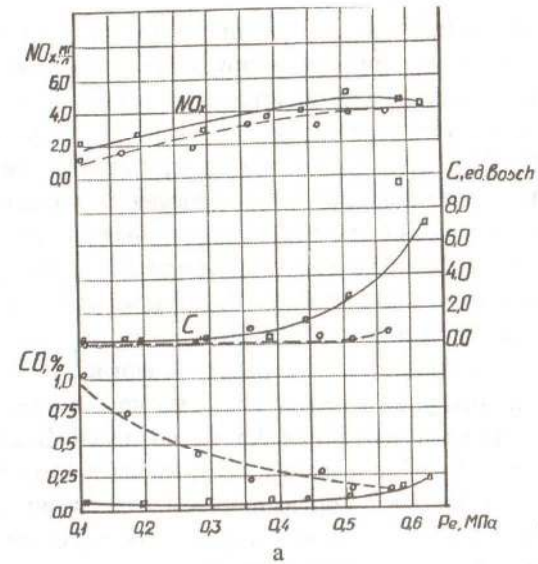


а

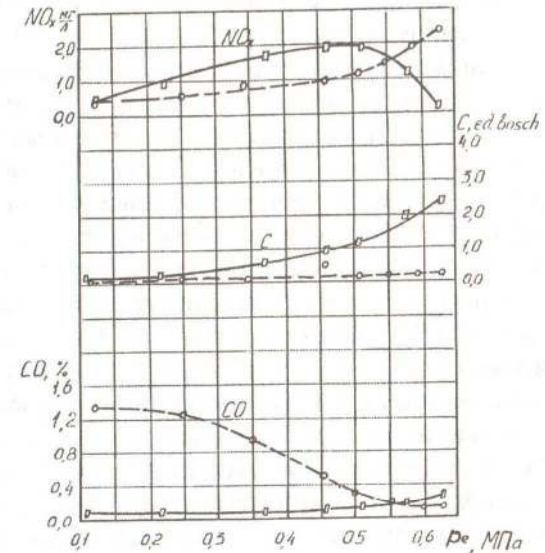


б

Рис. 4.26. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели в зависимости от частоты вращения дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{впр} = 22^\circ$ ;  $\square-\square$  - дизельный процесс;  $o---o$  - газодизельный процесс;  $\Delta---\Delta$  - расход запального ДТ



а



б

Рис. 4.27. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{впр} = 22^\circ$ ;  $\square-\square$  - дизельный процесс;  $o---o$  - газодизельный процесс

Однако при увеличении нагрузки содержание СО в ОГ при работе по газодизельному процессу снижается и при среднем эффективном давлении 0,57 МПа равняется содержанию СО в ОГ дизельного процесса. Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса), представлено на рис. 4.27,б. Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ при работе по дизельному и газодизельному процессам аналогичны рассмотренным выше. Изменяются лишь абсолютные значения. Содержание сажи в ОГ при работе по дизельному процессу снижается и достигает при максимальных средних эффективных значениях 2,5 ед. по шкале Боша. Значения содержания сажи в ОГ при работе по газодизельному процессу во всем диапазоне нагрузок не превышает 0,1...0,2 ед. по шкале Боша. Содержание СО в ОГ при малых нагрузках достигает на газодизельном процессе 1,3%, но при значении среднего эффективного давления 0,56 МПа становится равным содержанию СО в ОГ дизельного процесса. Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градуса (оптимальном для дизельного процесса), представлено на рис. 4.28,а. Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса), представлено на рис. 4.28,б. Анализ характеристик показывает, что общие закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ, в зависимости от нагрузки при работе по газодизельному процессу, в отличие их от дизельного, сохраняется и для частоты 1400 мин<sup>-1</sup>. Снижается содержание оксидов азота в ОГ во всем диапазоне нагрузок при работе по газодизельному процессу. Снижается содержание в ОГ сажи, причем наибольший эффект достигается при установочном угле 22 градуса. Рост содержания оксида углерода в ОГ при работе по газодизельному процессу наблюдается для обоих установочных углов и отличается только значениями. При высоких нагрузках содержание оксида углерода снижается и становится равным содержанию оксида углерода в ОГ дизельного процесса.

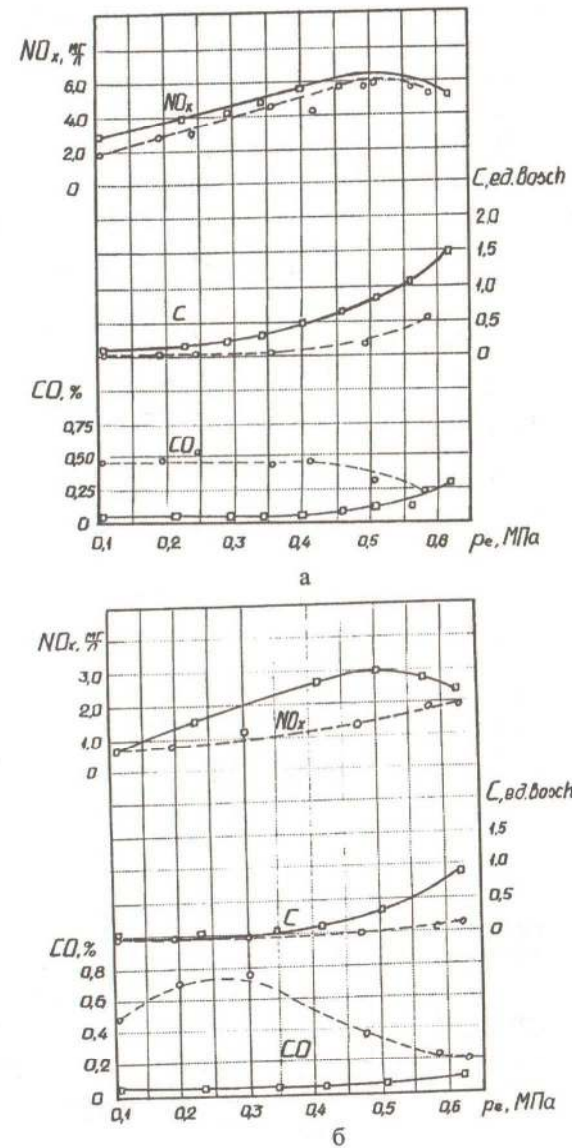
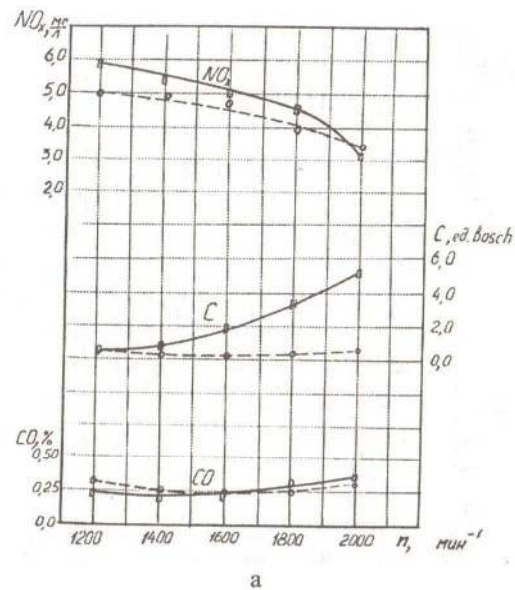
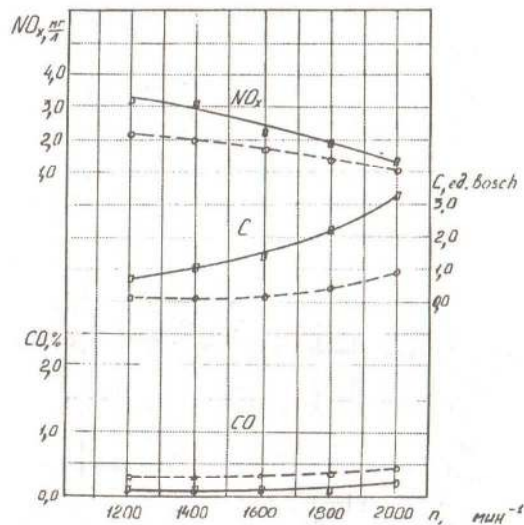


Рис. 4.28. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n=1400$  мин<sup>-1</sup>: а -  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{впр} = 22^\circ$ ;  $\square$  -  $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  -  $\circ$  - газодизельный процесс



а



б

Рис. 4.29. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2С 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения:

а -  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ ; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  
 $\circ - \circ - \circ$  - газодизельный процесс

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2С 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 26 градусов (оптимальном для дизельного процесса) в функции от частоты вращения представлено на рис. 4.29,а. Из графиков видно, что при увеличении частоты вращения во всем рассматриваемом диапазоне снижается содержание в ОГ оксидов азота и сажи при работе по газодизельному процессу. Причем, если при частоте вращения 1200 мин<sup>-1</sup> содержание сажи соответствует содержанию при дизельном процессе, то при частоте вращения 2000 мин<sup>-1</sup> она будет существенно отличаться и составлять при газодизельном процессе 0,5 ед. по шкале Боша, против 0,5 ед. по шкале Боша при дизельном процессе. Содержание оксида углерода в ОГ будет при изменении частоты вращения находиться при газодизельном процессе на уровне дизельного процесса, поскольку нагрузка дизеля будет номинальной.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2С 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания 22 градуса (оптимальном для газодизельного процесса) в функции от частоты вращения представлено на рис. 4.29,б.

Характер изменения содержания токсичных компонентов в ОГ, в зависимости от частоты вращения, аналогичен рассмотренным выше и отличается лишь величиной значений. Так, во всем диапазоне частот вращения наблюдаются снижение содержания в ОГ оксидов азота и сажи при работе по газодизельному процессу в сравнении с дизельным, и некоторое увеличение при этом выхода СО в ОГ.

#### 4.4.2. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4С 10,5/12,0 на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4С 10,5/12,0 от нагрузки по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного цикла установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса и частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 4.30,а.



Из графиков следует, что величина запального (дизельного) топлива не изменяется при изменении нагрузки и составляет 1,6...1,8 кг/ч, или 16...20% к часовому расходу топлива при работе по дизельному процессу. Температура ОГ на номинальной нагрузке снижается с 540 до 470°C при переходе с дизельного на газодизельный процесс. Эффективный к.п.д. при работе дизеля на газе на номинальном нагрузочном режиме выше, чем на дизельном процессе. Расход воздуха при обоих вариантах работы дизеля отличается незначительно - несколько меньше по газодизельному циклу. На номинальной нагрузке газодизель работает на смеси более обедненной состава, а при средних и малых нагрузках - более обогащенной по отношению к дизельному циклу, хотя в целом газозвоздушная смесь остается обедненной и условия ее воспламенения запальным ДТ ухудшаются, чем и объясняется изменение  $g_e$  и  $\eta_e$  на малых нагрузках.

Нагрузочные характеристики дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса и частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 4.30,б.

Из графиков видно, что расход запального (дизельного) топлива составляет около 1,5 кг/ч. Закономерности изменения остальных эффективных показателей, в зависимости от нагрузки, остаются аналогичны зависимостям при частоте вращения коленчатого вала дизеля 1800 мин<sup>-1</sup>. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса, представлено на рис. 4.31,а.

Анализ графиков показывает, что содержание в ОГ оксидов азота, сажи и диоксидов углерода ниже во всем диапазоне изменения нагрузок при работе на природном газе. Причем с увеличением нагрузки разность в концентрациях при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастает. Это объясняется тем, что при росте нагрузок увеличивается относительное замещение газом дизельного топлива, поскольку цикловая подача его, используемого в качестве запального топлива, остается постоянной, а регулирование нагрузки осуществляется изменением количества подаваемого в цилиндры газа.

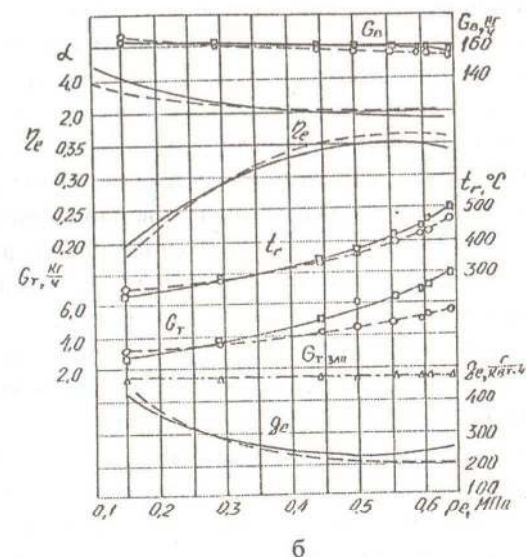
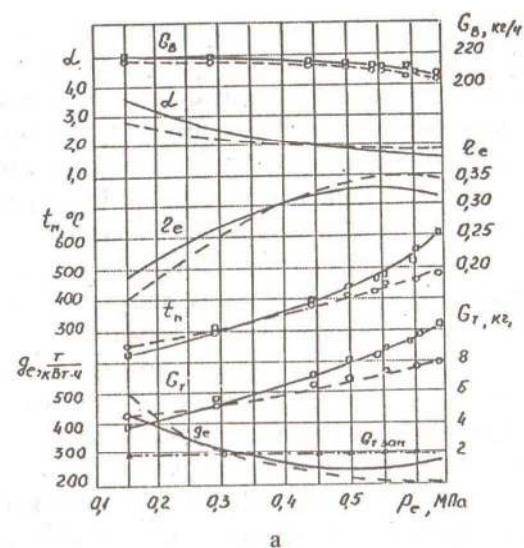


Рис. 4.30. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели дизеля 4Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ : а -  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>; □—□ - дизельный процесс; о---о - газодизельный процесс; Δ---Δ - расход запального ДТ

Зависимость содержания в ОГ суммарных углеводородов и оксидов углерода от нагрузки при работе по газодизельному процессу имеет иной характер: их концентрация существенно возрастает при уменьшении нагрузки и достигает максимума при снижении нагрузки до режима, близкого к холостому ходу. Поскольку эти компоненты являются продуктами неполного сгорания, то на увеличение их процентного содержания в ОГ оказывает влияние ухудшение процесса сгорания на малых нагрузках из-за переобеднения газовой смеси вследствие использования качественного способа регулирования мощности и воспламенения запальным дизельным топливом. В результате на малых нагрузках процесс распространения фронта пламени и весь процесс сгорания в целом протекает более вяло, способствуя неполному сгоранию топлива и, как уже отмечалось выше, ухудшению эффективного к.п.д.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $22^\circ$  при работе на дизельном топливе и по газодизельному циклу, представлено на рис. 4.31,б. Из графиков видно, что для этой частоты вращения зависимости изменения содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля от нагрузки при переходе с одного рабочего процесса на другой аналогичны зависимостям при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

На обоих скоростных режимах существенно снижается содержание сажи в ОГ при переходе на природный газ. Недостатком на сегодняшний день следует считать увеличение выброса продуктов неполного сгорания с ОГ при работе на газе. Очевидно, в этом случае необходимо применять другие известные средства снижения токсичности ОГ. Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 10,5/12,0 по дизельному и газодизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива  $22^\circ$  (оптимальном для газодизельного процесса) в функции от частоты вращения коленчатого вала, без регуляторной ветви, представлены на рис. 4.32,а. Из графиков следует, что при равных значениях эффективной мощности и крутящего момента во всем диапазоне частот вращения суммарный удельный эффективный расход топлива на газодизельном процессе ниже, чем на дизельном.

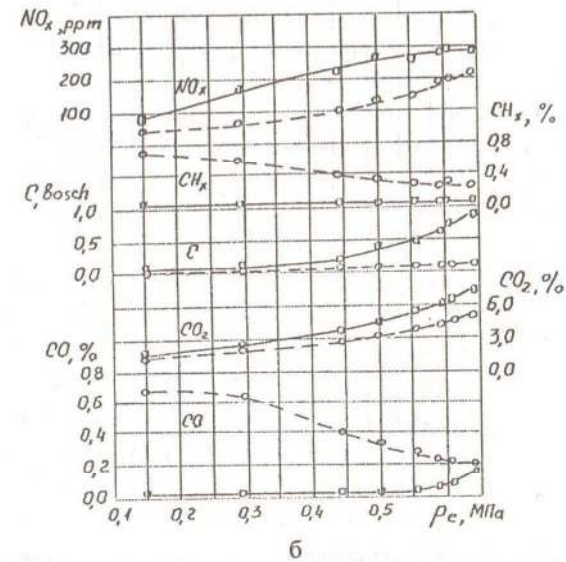
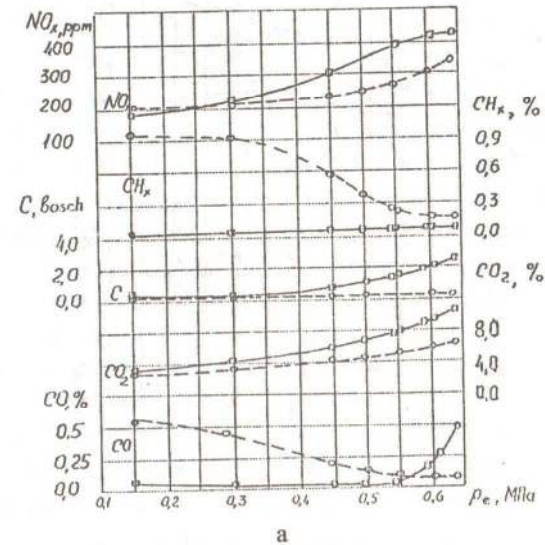
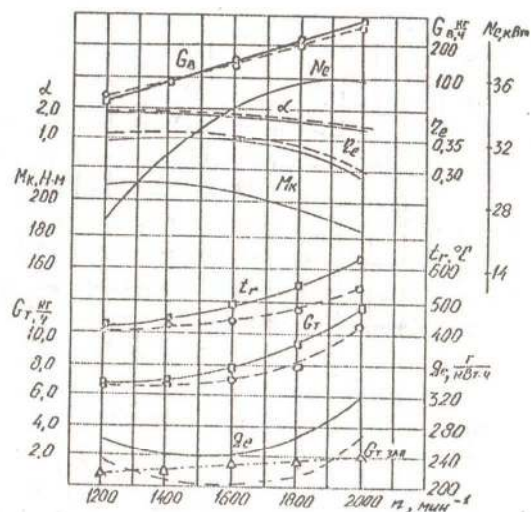
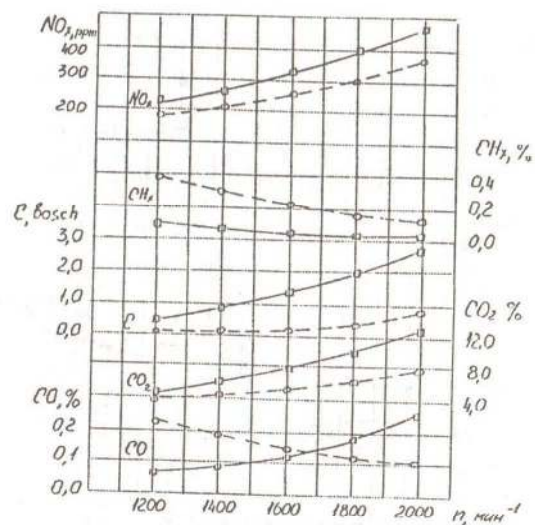


Рис. 4.31. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ : а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square - \square$  - дизельный процесс;  $\circ - \circ - \circ$  - газодизельный процесс



а



б

Рис. 4.32. Влияние применения природного газа в зависимости от частоты вращения дизеля 4Ч 10,5/12,0 при  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$ : а - на мощностные и экономические показатели; б - на содержание токсичных компонентов в ОГ;  $\square$ — $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  - - -  $\circ$  - газодизельный процесс;  $\Delta$  - - -  $\Delta$  - расход запального ДТ

Снижается также и суммарный часовой расход топлива, поскольку удельная теплота сгорания газа в данном случае выше, чем у ДТ на 14%. Во всем диапазоне частот вращения меньше температура ОГ. На максимальном скоростном режиме снижение составляет около  $80^\circ\text{C}$ . Значение эффективного к.п.д., благодаря тщательной проработке конструкции смесителя-дозатора и системы впуска, выше на 1,5...2,0% во всем диапазоне изменения частот вращения при работе на газе. Цикловая подача запального ДТ оставалась при изменении частоты вращения дизеля постоянной, поэтому часовой расход запального топлива изменялся от 1,4 кг/ч до 1,9 кг/ч при увеличении частоты вращения от 1200 до 2000  $\text{min}^{-1}$ . Таким образом, снижение расхода ДТ за счет замещения его природным газом на всех скоростных режимах составило не менее 80%.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе по дизельному и газодизельному процессам и установочном угле опережения впрыскивания топлива 22 градуса в функции от частоты вращения представлено на рис. 4.32,б.

Из графиков следует, что при увеличении частоты вращения во всем рассматриваемом диапазоне содержание в ОГ дизеля оксидов азота, сажи и диоксида углерода ниже при работе на природном газе. Содержание суммарных углеводородов выше для газодизельного цикла для всех скоростных режимов в 4...5 раз. Причем при уменьшении частоты вращения концентрация  $\text{CH}_x$  в ОГ растет как для дизельного, так и для газодизельного процессов. Содержание в ОГ оксида углерода при работе на ДТ растет с увеличением частоты вращения и падает при работе на природном газе. Причем, начиная с частоты вращения 1700  $\text{min}^{-1}$  и выше, концентрация  $\text{CO}$  в ОГ для газодизельного цикла ниже, чем для дизельного.

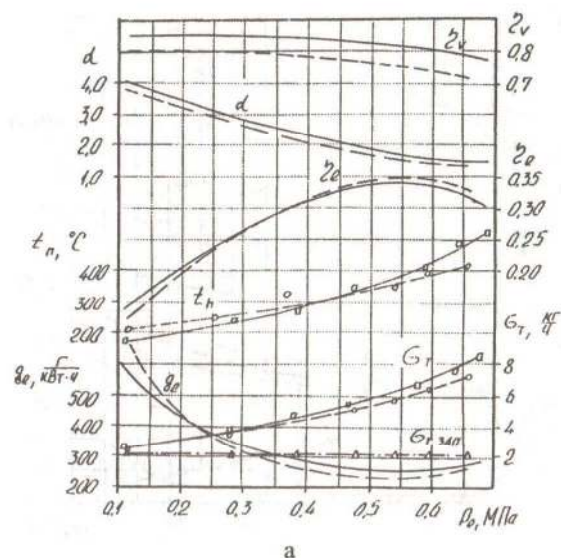
#### 4.4.3. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 3Ч 9,5/10,00 путем природного газа

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 3Ч 9,5/10,0 при изменении нагрузки по дизельному и газодизельному процессам представлены на рис. 4.33. Из графиков изменения нагрузки на номинальном ( $2400 \text{ min}^{-1}$ ) скоростном режиме (см. рис. 4.33,а) следует, что величина расхода запального (дизельного) топлива не изменялась и составляла 2,0...2,2 кг/ч. На номи-

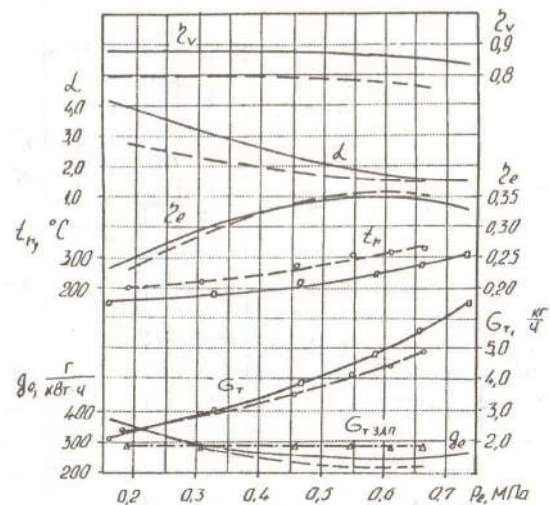
нальном режиме это составляет 25% от часового расхода топлива при работе дизеля по дизельному циклу. Эффективный к.п.д. при работе дизеля на природном газе на номинальном режиме выше на 2%, чем при работе по дизельному процессу. Температура ОГ дизеля снижается на номинальной нагрузке с 490 до 420°C при переходе с дизельного на газодизельный процесс. На малых нагрузках наблюдается повышение температуры ОГ газодизеля по отношению к дизельному процессу. Причиной является снижение коэффициента наполнения  $\eta_v$  и обеднение смеси на впуске. Поскольку при работе дизеля на природном газе используется качественный способ регулирования мощности, то на малых нагрузках наблюдаются переобеднение смеси, что проявляется в возрастании удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , и падение  $\eta_e$  вследствие ухудшения воспламенения газозвушной смеси.

Нагрузочные характеристики дизеля ЗЧ 9,5/10,0 при работе на природном газе по газодизельному процессу и по дизельному процессу на частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> (режим максимального крутящего момента) представлены на рис. 4.33,б. Из графиков видно, что расход запального ДТ на этом скоростном режиме составляет 1,8 кг/ч. Закономерности изменения других эффективных показателей, в зависимости от нагрузки, остаются аналогичными зависимостям при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>, за исключением температуры отработавших газов, значения которой выше у газодизеля во всем диапазоне изменения нагрузок. Повышение эффективного к.п.д. на обоих скоростных режимах и различных нагрузках связано с увеличением процентного выгорания топлива в начальный период при работе по газодизельному циклу, что приводит к снижению доли потери тепла в этот период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что и предопределяет более эффективное использование тепла в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля ЗЧ 9,5/10,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 2400 мин<sup>-1</sup>, представлено на рис. 4.34,а. Анализ графиков показывает, что содержание в ОГ оксидов азота, сажи и диоксида углерода ниже во всем диапазоне изменения нагрузок при работе на природном газе.

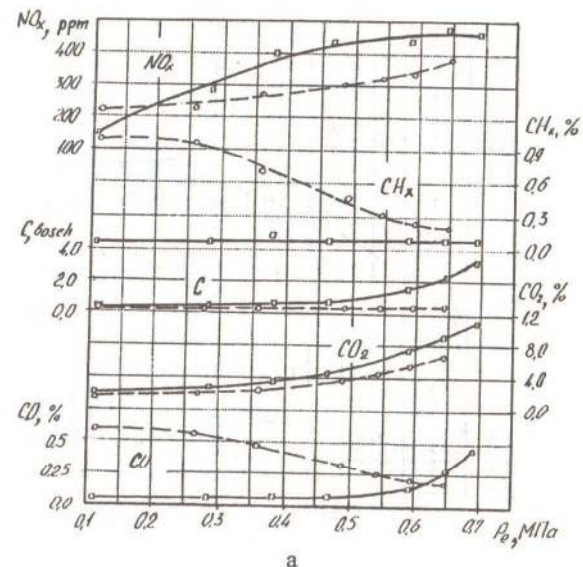


а

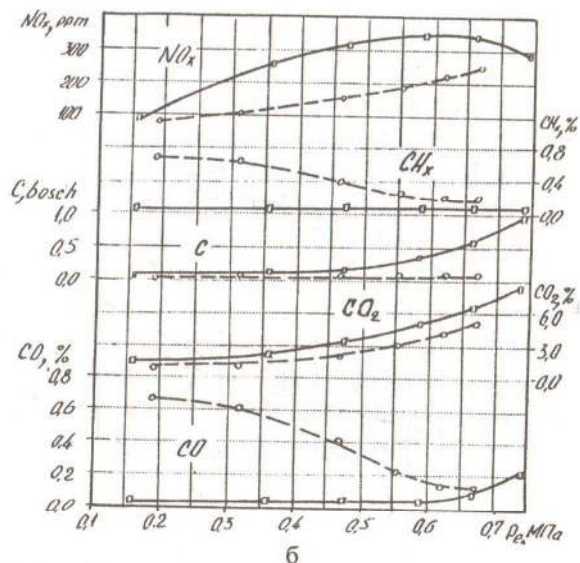


б

Рис. 4.33. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели дизеля ЗЧ 9,5/10,0 в зависимости от нагрузки: а -  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>; □ - □ - дизельный процесс; о - - - о - газодизельный процесс; Δ - - - Δ - расход запального ДТ



а



б

Рис. 4.34. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 3Ч 9,5/10,0 в зависимости от нагрузки:  
а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square-\square$  - дизельный процесс;  
 $o---o$  - газодизельный процесс

Причем с увеличением нагрузки разность в концентрациях при работе по дизельному и газодизельному циклам возрастает: оксидов азота становится меньше на максимальной нагрузке на 17,4%, диоксидов углерода на 2,4%, сажи - в 6 раз. Это объясняется тем, что при росте нагрузки увеличивается относительное замещение газом ДТ, поскольку цикловая подача его, используемого в качестве запального, остается постоянной, а регулирование нагрузки осуществляется изменением количества подаваемого в цилиндры газа.

Зависимость содержания в ОГ дизеля суммарных углеводородов и оксидов углерода от нагрузки при работе по газодизельному циклу имеет другой характер: их концентрация примерно одинакова на максимальных нагрузках и существенно возрастает при уменьшении нагрузки, достигая максимума при сбросе нагрузки до режима, близкого к режиму холостого хода. Поскольку эти компоненты являются продуктами неполного сгорания, то на увеличение их процентного содержания в ОГ оказывает влияние ухудшение процесса сгорания на малых нагрузках из-за переобеднения газозвоздушной смеси вследствие использования качественного способа регулирования мощности и воспламенения запальным ДТ. В результате на малых нагрузках процесс распространения фронта пламени и весь процесс сгорания в целом протекает более вяло, способствуя неполному сгоранию топлива и, как уже отмечалось, ухудшению эффективного к.п.д.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 3Ч 9,5/10,0, в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  при работе на природном газе, представлено на рис. 4.34,б. Из графиков видно, что для этой частоты вращения зависимости изменения содержания токсичных компонентов в ОГ от нагрузки при переходе с одного вида топлива на другой аналогичны зависимостям при частоте вращения  $2400 \text{ мин}^{-1}$ .

На обоих скоростных режимах существенно снижается содержание сажи в ОГ дизеля при переходе на природный газ практически до нуля и не возрастающее более при увеличении нагрузки. Недостатком является увеличение выброса продуктов неполного сгорания с ОГ дизеля при работе на газе. Очевидно, в этом случае возникает необходимость применения других методов снижения токсичности ОГ дизелей.

Влияние применения природного газа, в зависимости от частоты вращения дизеля ЗЧ 9,5/10,0 на мощностные и экономические показатели, представлено на рис. 4.35,а. По графику изменения удельного эффективного расхода топлива видно, что во всем основном рабочем диапазоне частоты вращения коленчатого вала его значения у газодизельного процесса меньше, чем дизельного. Это объясняется высокой удельной теплотой сгорания газа и снижением в связи с этим массового расхода топлива, что также подтверждается и графиками изменения часового расхода топлива.

Проведенное ранее индицирование процесса сгорания газодизельного цикла позволило установить, что сгорание газозвушной смеси при воспламенении ее запальным ДТ происходит более активно, с большими скоростями, и заканчивается быстрее. Это приводит, с одной стороны, к увеличению максимального давления сгорания  $p_z$  и увеличению скорости нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$ . С другой стороны, возрастает индикаторный к.п.д., поскольку потери тепла в данном случае уменьшаются. Это подтверждается графиком эффективного к.п.д., который учитывает удельную теплоту сгорания топлива. Значения эффективного к.п.д. выше во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала на 1,5...2,0% при работе на природном газе. Некоторое ухудшение экономичности при работе на природном газе наблюдается при частоте вращения менее  $1500 \text{ мин}^{-1}$ , что объясняется ухудшением смесеобразования газозвушной смеси вследствие уменьшения разрежения и падения скорости воздуха во впускном трубопроводе. Суммарный часовой расход топлива дизеля при работе на природном газе снижается на 1,0...1,5 кг/ч. Расход запального ДТ изменяется от 1,3 до 2,1 кг/ч, что по сравнению с дизельным процессом меньше на 73...78%. Несмотря на корректировку расчетных параметров газозвушного смесителя-дозатора, не удалось избежать некоторого ухудшения коэффициента наполнения на 3...4% во всем диапазоне частот вращения. На его снижение повлияла также установка пневмеханического ограничителя максимальной частоты вращения. Этим объясняется частичное обогащение топливовоздушной смеси, что наблюдается на графике изменения коэффициента избытка воздуха, а также увеличение температуры ОГ. Характер изменения крутящего момента  $M_k$  плавный,

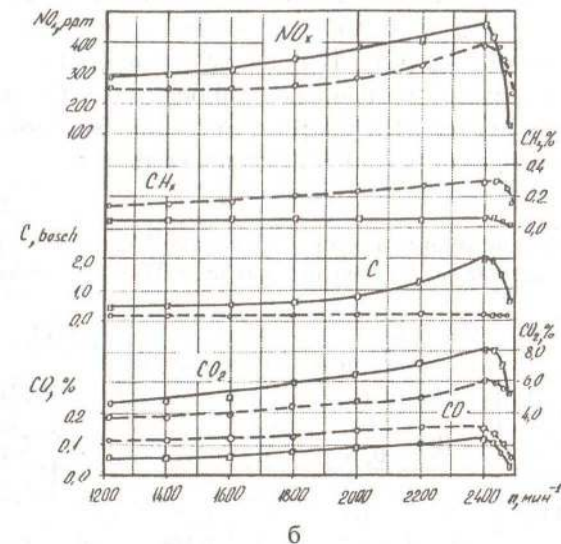
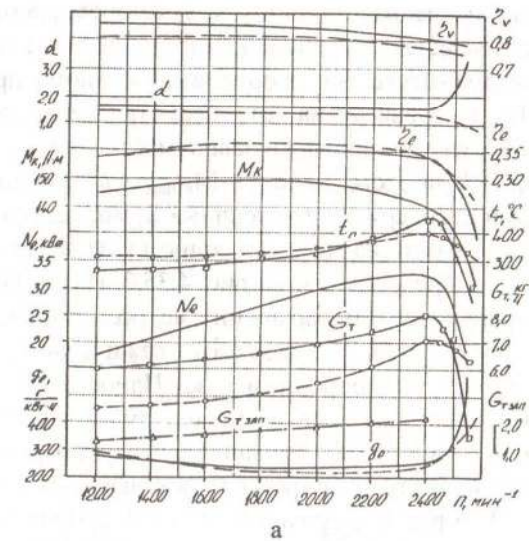


Рис. 4.35. Влияние применения природного газа в зависимости от частоты вращения дизеля ЗЧ 9,5/10,0: а - на мощностные и экономические показатели; б - на содержание токсичных компонентов в ОГ;  $\square$ — $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  - - -  $\circ$  - газодизельный процесс;  $\Delta$  - - -  $\Delta$  - расход запального ДТ

поскольку интервал частоты вращения, в котором работает двигатель по скоростной характеристике, достаточно велик. Коэффициент запаса крутящего момента при работе по дизельному процессу составляет 7...10%. При работе на газе, несмотря на отсутствие корректора, характер изменения  $M_k$ , в зависимости от частоты вращения, сохраняется. При этом значения  $M_{k \max}$  лежат в интервале от 1600 до 1900  $\text{мин}^{-1}$ . Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 3Ч 9,5/10,0 при работе на ДТ и природном газе, в зависимости от частоты вращения, представлено на рис. 4.35,б. Из графиков видно, что при увеличении частоты вращения во всем рассматриваемом диапазоне содержание в ОГ оксидов азота, сажи и диоксида углерода ниже при работе на природном газе. Наиболее существенное снижение сажи наблюдается на номинальном скоростном режиме при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  - в 8 раз. Содержание суммарных углеводородов в ОГ при работе на сжатом природном газе выше на всех скоростных режимах в 3...5 раз. Содержание СО в ОГ дизеля также выше при работе на природном газе, но имеет плавный характер изменения. Концентрация в ОГ СО при номинальной частоте вращения выше в среднем в 2 раза, чем при работе по чисто дизельному процессу. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 3Ч 9,5/10,0 при работе на ДТ и природном газе на различных скоростных режимах без нагрузки представлено в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 3Ч 9,5/10,0 при различной частоте вращения без нагрузки при работе на ДТ и природном газе

Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	ДТ				ГАЗ			
	токсичные компоненты							
	СО, %	СО <sub>2</sub> , %	СН <sub>х</sub> , %	NO <sub>х</sub> , ppm	СО, %	СО <sub>2</sub> , %	СН <sub>х</sub> , %	NO <sub>х</sub> , ppm
1100	0,088	1,46	0,04	100	0,125	1,28	0,48	96
1300	0,092	1,58	0,05	111	0,163	1,36	0,47	84
1500	0,100	1,72	0,06	116	0,207	1,43	0,61	56
1700	0,122	1,92	0,07	123	0,168	1,65	0,66	53
1900	0,138	2,21	0,08	1150	0,140	2,06	1,12	102
2100	0,145	2,59	0,09	177	0,187	2,28	1,12	115
2300	0,163	2,80	0,094	192	0,145	2,54	2,78	129
2500	0,165	3,07	0,10	198	0,174	2,81	2,2	86

Из данных таблицы следует, что на режиме холостого хода влияние подачи газа на содержание токсичных компонентов в ОГ сохраняется: NO<sub>х</sub> и СО<sub>2</sub> меньше, а СО и СН<sub>х</sub> возрастает по сравнению с номинальным нагрузочным режимом.

#### 4.4.4. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4Ч 9,85/12,7 путем применения природного газа

Зависимости мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 9,85/12,7 от нагрузки при частоте вращения 2400  $\text{мин}^{-1}$  при работе по дизельному и газодизельному процессам представлены на рис. 4.36,а. Из графиков видно, что величина расхода запального (дизельного) топлива практически не изменялась во всем диапазоне нагрузок и составляла 4,1 кг/ч. На номинальном режиме расход топлива при дизельном процессе составляет 12,4 кг/ч. Величина запального топлива составляет около 30%. Эффективный к.п.д. при газодизельном процессе не изменяется во всем диапазоне нагрузок и соответствует к.п.д. дизельного процесса. Температура ОГ при больших нагрузках при газодизельном процессе снижается, однако при малых нагрузках - возрастает. Это является следствием снижения коэффициента наполнения и обогащения смеси на впуске. При снижении нагрузки резко возрастает удельный эффективный расход топлива. Нагрузочная характеристика дизеля 4Ч 9,85/12,7 при работе по дизельному и газодизельному процессам на частоте 1500  $\text{мин}^{-1}$  (режим максимального крутящего момента) представлена на рис. 4.36,б. Из графиков видно, что расход запального топлива составляет 3,5...3,8 кг/ч и весьма незначительно изменяется во всем диапазоне изменения нагрузки. Эффективный к.п.д. газодизельного процесса соответствует к.п.д. дизельного процесса. Температура ОГ газодизельного процесса выше и на номинальном режиме возрастает на 250°C. При снижении нагрузки резко возрастает удельный эффективный расход топлива. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 9,85/12,7, в зависимости от нагрузки при частоте вращения 2400  $\text{мин}^{-1}$ , представлено на рис. 4.37.

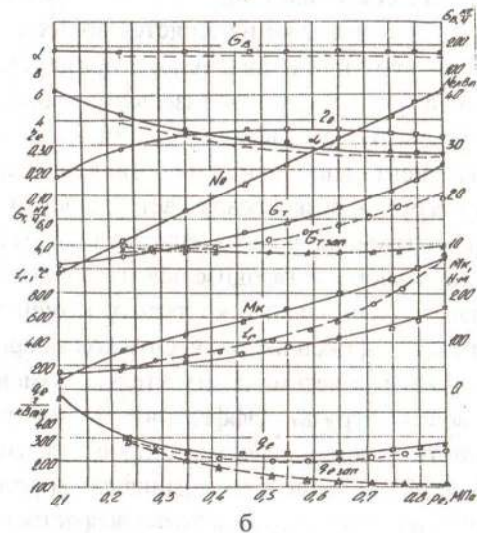
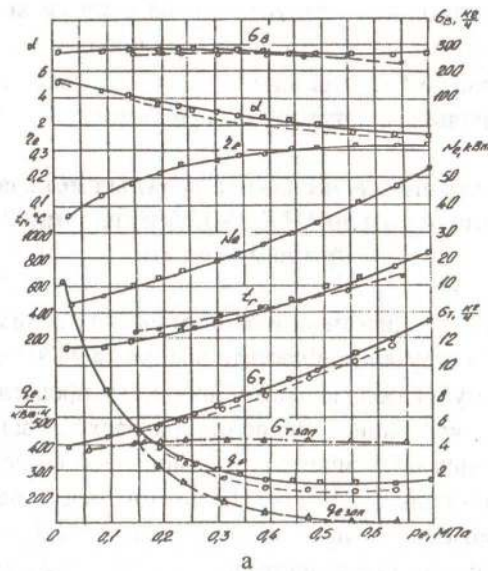
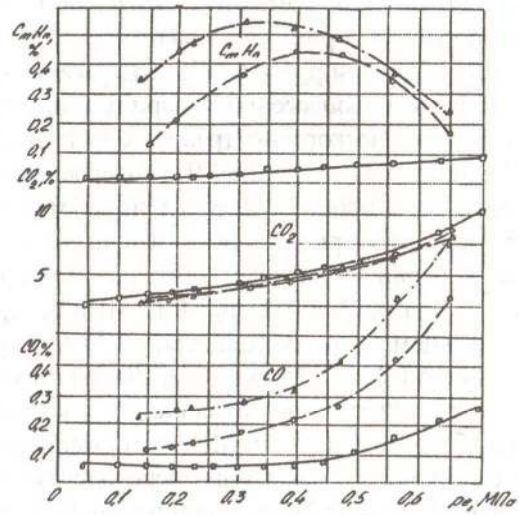


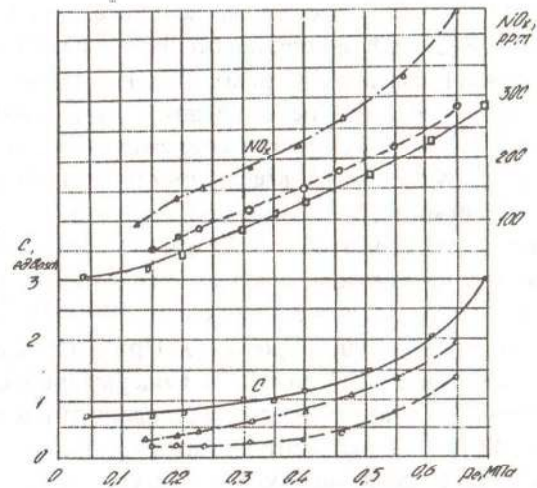
Рис. 4.36. Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели дизеля 4Ч 9,85/12,7 в зависимости от нагрузки: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  - газодизельный процесс;  $\Delta$  - расход запального ДТ

Анализ графиков показывает, что содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и суммарных углеводородов (см. рис. 4.37,а) выше при работе по газодизельному процессу. Так, при  $p_e = 0,6 \text{ МПа}$  содержание  $\text{CO}$  составляет 0,18% при дизельном процессе и 0,7% при газодизельном процессе. Установка каталитического нейтрализатора позволяет снизить содержание  $\text{CO}$  до 0,5%. При  $p_e = 0,6 \text{ МПа}$  содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ составляет при дизельном процессе 0,08%, при работе по газодизельному процессу уже 0,3%. При установке каталитического нейтрализатора - 0,28%. Большой эффект дает нейтрализатор при работе дизеля на малых нагрузках. Так, при  $p_e = 0,15 \text{ МПа}$  содержание в ОГ  $\text{CH}_x$  при газодизельном процессе составляет 0,35%, а при установке нейтрализатора всего 0,13%. Переход на работу по газодизельному процессу оказывает существенное влияние на содержание в ОГ сажи (см. рис. 4.37,б). Так, при  $p_e = 0,6 \text{ МПа}$  содержание сажи в ОГ составляет 2,0 ед. по шкале Боша, то при переходе на газодизельный процесс уже 1,6 ед. по шкале Боша, а при работе по газодизельному процессу с нейтрализатором не превышает 1,0 по шкале Боша, т.е. снижение составляет 50%. Содержание оксидов азота в ОГ меняется по сложной зависимости. Если при работе на газе с нейтрализатором содержание оксидов азота в ОГ находится на уровне дизельного процесса, то при работе без нейтрализатора содержание оксидов азота возрастает с 200 до 320 ppm. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 9,85/12,7, в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$ , представлено на рис. 4.38. Анализ графиков показывает, что содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и суммарных углеводородов выше при работе по газодизельному процессу (см. рис. 4.38,а). Так, при  $p_e = 0,8 \text{ МПа}$  содержание  $\text{CO}$  составляет 0,1% при дизельном и 0,35% при газодизельном процессах. Применение нейтрализатора снижает содержание  $\text{CO}$  до 0,07%. Содержание  $\text{CO}_2$  при этой же нагрузке при дизельном процессе составляет 5%, а при газодизельном уже 9%. Установка нейтрализатора снижает содержание  $\text{CO}_2$  в ОГ до 3,5%. Содержание суммарных углеводородов при дизельном процессе составляет 0,08%, а при газодизельном уже 0,16%. Установка нейтрализатора позволяет снизить содержание углеводородов в ОГ до 0,1%. Картина изменения содержания в ОГ сажи и оксидов азота при переходе на газодизельный процесс (рис. 4.38,б) при частоте  $1500 \text{ мин}^{-1}$  аналогична рассмотренной ранее при частоте вращения  $2400 \text{ мин}^{-1}$ .



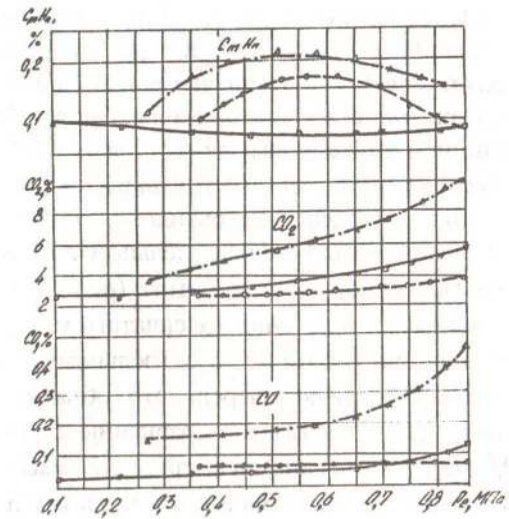


a

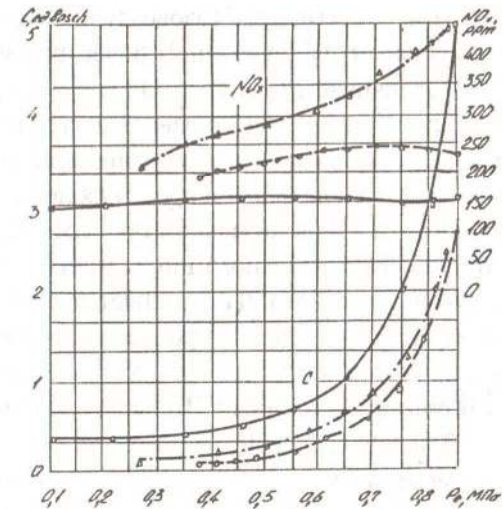


б

Рис. 4.37. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4С 9,85/12,7 в зависимости от нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ : а - для  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и CO; б - для  $\text{NO}_x$  и C;  
 □—□ - дизельный процесс; о --- о - газодизель с нейтрализатором ОГ;  
 Δ --- Δ - газодизель без нейтрализатора ОГ



a



б

Рис. 4.38. Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4С 9,85/12,7 в зависимости от нагрузки при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ : а - для  $\text{CH}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и CO; б - для  $\text{NO}_x$  и C;  
 □—□ - дизельный процесс; о --- о - газодизель с нейтрализатором ОГ;  
 Δ --- Δ - газодизель без нейтрализатора ОГ

Если при дизельном процессе и  $p_c = 0,8$  МПа содержание сажи составило 3,0 ед. по шкале Боша, то при переходе на газодизельный процесс составляет уже 1,6 ед. по шкале Боша. При установке нейтрализатора содержание сажи еще несколько ниже. Содержание в ОГ оксидов азота при этой же нагрузке составляет 150 ppm при дизельном процессе и 410 ppm при газодизельном процессе. Установка нейтрализатора снижает содержание оксидов азота в ОГ до 240 ppm.

По характеру изменения графика удельного эффективного расхода топлива на скоростной характеристике (рис. 4.39,а) видно, что во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля удельный расход топлива при работе по газодизельному процессу ниже, чем у дизельного. В первую очередь это объясняется высокой удельной теплотой сгорания газа по сравнению с ДТ (49 МДж/кг против 42,5 МДж/кг) и снижением в связи с этим массового расхода топлива, что также подтверждается и графиками изменения часового расхода топлива. Проведенные ранее исследования позволяют сделать вывод о том, что сгорание газозвдушной смеси при воспламенении ее запальным ДТ происходит более активно, с большими скоростями, и заканчивается быстрее. Однако это приводит к некоторому повышению максимального давления сгорания и увеличению скорости нарастания давления. Значения эффективного к.п.д. во всем диапазоне изменения частоты вращения лежат не ниже значений эффективного к.п.д. при дизельном процессе. Суммарный часовой расход топлива газодизельного цикла меньше дизельного на 1,6...1,8 кг/ч. Расход запального ДТ изменяется от 3,2 кг/ч до 4,2 кг/ч. Расход топлива при дизельном процессе изменяется от 9,2 до 13,5 кг/ч, снижение составляет более 70%. Характер изменения кривой крутящего момента  $M_k$  плавный. Запас крутящего момента составляет 50 Н·м. При работе на газе, несмотря на отсутствие корректора, характер изменения  $M_k$  в зависимости от частоты вращения, сохраняется. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 9,85/12,7 при работе по дизельному и газодизельному процессам, в зависимости от частоты вращения, представлено на рис. 4.39,б и в. Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу содержание СО, СО<sub>2</sub> и суммарных углеводородов увеличивается во всем исследуемом диапазоне частот вращения (см. рис. 4.39,б).

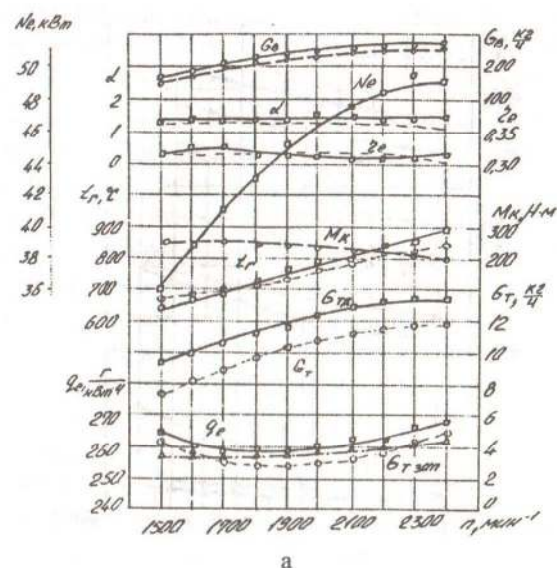
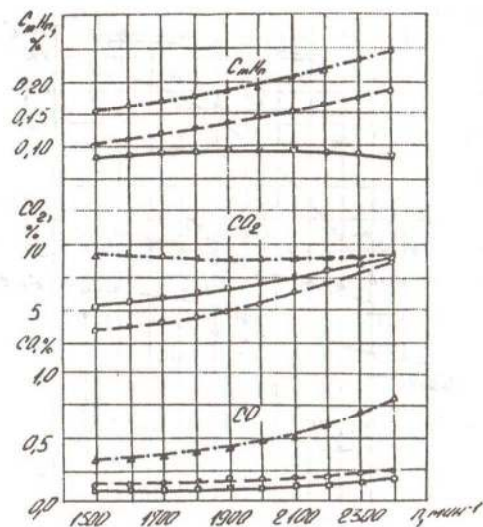
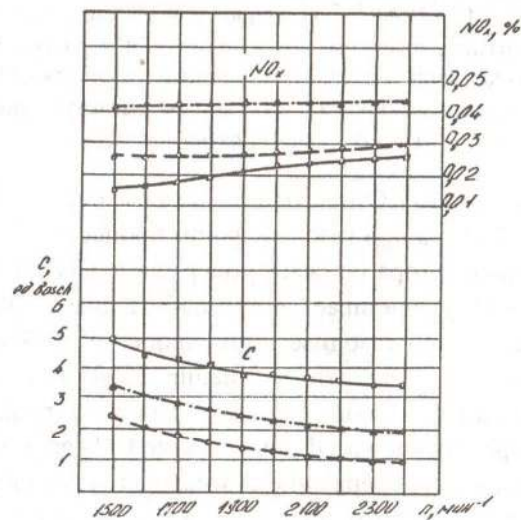


Рис. 4.39. Влияние применения природного газа в зависимости от частоты вращения дизеля 4Ч 9,85/12,7: а - на мощностные и экономические показатели; б - на содержание токсичных компонентов в ОГ для  $CH_x$ ,  $CO_2$  и  $CO$ ; в - на содержание токсичных компонентов в ОГ для  $NO_x$  и  $C$ ; □—□ - дизельный процесс; о --- о - газодизельный процесс; Δ --- Δ - расход запального ДТ

Так, содержание СО при работе по дизельному процессу составляет 0,1...0,2%, а при газодизельном процессе - 0,3...0,8%. Установка нейтрализатора снижает содержание СО до 0,12...0,25%. Содержание СО<sub>2</sub> увеличивается при работе дизеля на малой частоте вращения и при газодизельном процессе до 9% против 6% при дизельном. При частоте вращения 2400 мин<sup>-1</sup> содержание СО<sub>2</sub> практически одинаково на обоих видах топлива. Установка нейтрализатора снижает в ОГ содержание СО<sub>2</sub> до 3,5% на малых частотах вращения. Содержание суммарных углеводородов выше во всем диапазоне частот вращения и составляет 0,15% против 0,08% при дизельном при 1500 мин<sup>-1</sup> и 0,25% против 0,075% при 2400 мин<sup>-1</sup>. Установка каталитического нейтрализатора позволила снизить содержание суммарных углеводородов до 0,1...0,18%.



б



в

Условные обозначения для рис. 4.39 б и в:  
 о --- о - газодизель с нейтрализатором ОГ;  
 Δ --- Δ - газодизель без нейтрализатора ОГ

Содержание сажи при изменении частоты вращения снижается во всем диапазоне частот вращения (см. рис. 4.39, в). Так, если содержание сажи при дизельном процессе составляет в ОГ 5...3,4 ед. по шкале Боша соответственно при 1500 и 2400 мин<sup>-1</sup>, то при переходе на газодизельный процесс составляет уже 3,4...2,0 ед. по шкале Боша. Установка каталитического нейтрализатора позволяет снизить содержание сажи в ОГ до 2,5...0,9 ед. по шкале Боша. Содержание оксидов азота в ОГ дизеля при работе на газе выше, чем при дизельном процессе. Так, при дизельном процессе содержание оксидов азота при 1500 мин<sup>-1</sup> составляет 0,15% и при 2400 мин<sup>-1</sup> - 0,026%. При работе по газодизельному процессу содержание оксидов азота составляет уже 0,042...0,044%. Установка каталитического нейтрализатора снижает содержание оксидов азота до 0,026...0,003%.

Делая выводы, необходимо отметить, что экспериментальные исследования рабочего процесса в цилиндре газодизеля при работе на природном газе позволили определить параметры оптимальных регулировочных показателей, значения допустимых показателей процесса горения МВС, характеристики тепловыделения и динамики тепловыделения, значения осредненных температур газов в цилиндре. Установлено, что для дизелей 2Ч 10,5/12,0 и 4Ч 10,5/12,0 на номинальных нагрузочных и скоростных режимах значения скорости нарастания давления газов в цилиндре увеличиваются, сокращается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, увеличивается степень повышения давления, значительно возрастает максимальное давление газов в цилиндре, возрастает скорость активного тепловыделения, изменяется характер кривых скорости отвода тепла и полезного выделения тепла, увеличивается осредненная температура газов в цилиндре, максимальные значения сдвигаются в сторону в.м.т. При газодизельном процессе "жесткость" процесса сгорания увеличивается при возрастании нагрузки. Экспериментальными исследованиями установлено, что при работе тракторных дизелей по газодизельному процессу величина ДТ (запального) составляет 25...30% от расхода топлива. Подача природного газа составляет 70...80%. Установочный угол опережения впрыскивания топлива должен уменьшаться на 3...5 градусов п.к.в. для снижения "жесткости" работы газодизеля. Существенно снижается содер-

жание сажи в ОГ на нагрузочных режимах, особенно в области нагрузок более 0,3 МПа для всех исследуемых дизелей: с 2,2 до 0,3 ед. по шкале Боша (2Ч 10,5 / 12,0); с 2,0 до 0,3 ед. по шкале Боша (4Ч 10,5/12,0); с 2,1 до 0,2 ед. по шкале Боша (3Ч 9,5/10,0); с 2,0 до 1,5 и до 1,0 (с каталитическим нейтрализатором) ед. по шкале Боша (4Ч 9,85/12,7). Снижение содержания сажи по скоростным характеристикам еще более существенно. Установлено также снижение содержания оксидов азота. Вместе с тем в ОГ газодизеля наблюдается увеличение содержания продуктов неполного сгорания СО и СО<sub>2</sub>, для уменьшения которых необходимо применять другие методы снижения токсичности.

## 5. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТРАКТОРОВ И САМОХОДНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДЛЯ РАБОТЫ НА СЖАТОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

### 5.1. Разработка систем регулирования для тракторов и самоходных погрузчиков, работающих на сжатом природном газе

#### 5.1.1. Разработка системы регулирования для дизелей тракторов, работающих на сжатом природном газе и оборудованных насосами распределительного типа

Для обеспечения работы тракторного дизеля по газодизельному процессу при взаимной конвертации одним из главных условий является обеспечение работы газодизеля по всережимной характеристике. Вторым необходимым условием является возможность быстрого перевода работы дизеля с одного вида топлива на другой и обратно. Исходя из этих условий, система регулирования газодизеля должна базироваться на существующей штатной топливной аппаратуре с соответствующей модернизацией для регулирования газодизеля [357...374].

Для насосов распределительного типа семейства НД, устанавливаемых на дизелях 2Ч 10,5/12,0 (Д-21А1), 4Ч 10,5/12,0 (Д-144) тракторов Т-25А, Т-30, самоходных шасси Т-16МГ, тракторов Т-40А и их модификациях, а также установках АДД-4002У1, нами была разработана универсальная система регулирования газодизеля на основе а.с. № 1537859 и пат. № 2119078 РФ.

Схема системы регулирования газодизелей с топливными насосами распределительного типа представлена на рис. 5.1. Данная система позволяет легко переводить дизель с одного вида топлива на другой, четко фиксировать дозатор насоса на запальной дозе ДТ, обеспечивать работу газодизеля по всережимной характеристике.

Система регулирования работает следующим образом. При работе по дизельному процессу рычаг 2, связанный с педалью в кабине трактора (рычагом управления подачей топлива), растягивая пружину регулятора 1, обеспечивает работу дизеля на час-

точной скоростной характеристике, поскольку главный рычаг регулятора 4 под воздействием муфты регулятора 3 плавно скользит по сектору 5.

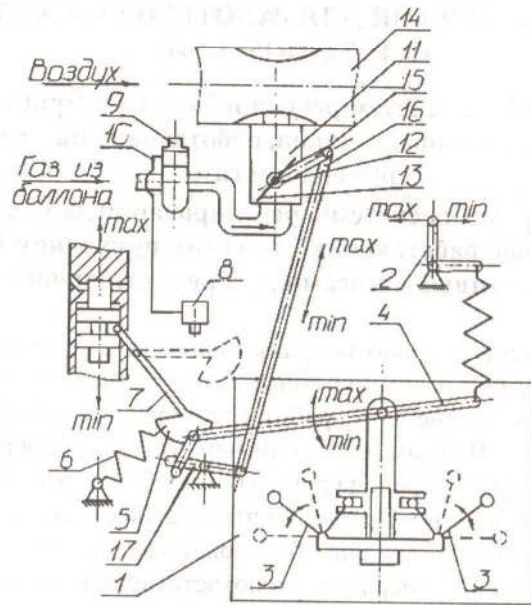


Рис. 5.1. Схема системы регулирования газодизелей с топливными насосами распределительного типа семейства НД:

- 1 - всережимный регулятор; 2 - рычаг управления регулятором; 3 - муфта регулятора; 4 - главный рычаг регулятора; 5 - сектор; 6 - пружина; 7 - двуплечий рычаг; 8 - электромагнитный клапан; 9 - электромагнитный клапан для подачи газа; 10 - провод; 11 - дозатор газа; 12 - пружина; 13 - заслонка газовая; 14 - смеситель; 15 - рычаг газовой заслонки; 16 - тяга газовой заслонки; 17 - двуплечий рычаг привода газовой заслонки

Сектор 5 всегда прижат к рычагу 4 пружиной 6. Последний через двуплечий рычаг 7 перемещает привод дозатора насоса от минимальной подачи до максимальной в зависимости от нагрузки и оборотов. В случае перехода на работу на природном газе, тракторист в кабине трактора включает выключатель подачи газа, электромагнитный клапан подачи газа 9 открывается, газ начинает поступать в дозатор 11. Одновременно, поскольку клапаны 8 и 9 заблокированы, прекращается подача тока в клапан 8, он вы-

ключается и своим штоком блокирует двуплечий рычаг 7 в таком положении, что он своим концом устанавливает дозатор в положение, соответствующее подаче запальной дозы ДТ. При этом рычаг 7 поднимается вверх и не препятствует перемещению двуплечего рычага 17 привода газовой заслонки, который с этого момента будет перемещаться под воздействием рычага 4 регулятора и управлять подачей газа через тягу 16 и рычаг 15. Постоянное прижатие рычага 17 к концу рычага 4 обеспечивается пружиной 12 газовой заслонки 13. При этом регулятор 1 обеспечит через систему регулирования подачу газа в смеситель 14 в зависимости от нагрузки и частоты вращения. Положение рычага 2 управления регулятором остается неизменным. При переходе обратно на работу на ДТ необходимо обесточить клапан 9 и подать ток на клапан 8. Подача газа при этом прекратится, а клапан 8 освободит при этом рычаг 7 привода дозатора. Рычаг регулятора 4 вновь будет воздействовать на сектор 5, рычаг 7 и дозатор, изменяя подачу ДТ в зависимости от режима работы. Перемещение рычага 17, также прижимающегося к рычагу 4 и вращающего газовую заслонку 13, не окажет на работу дизеля никакого влияния, поскольку газ в систему питания не подается.

### 5.1.2. Разработка системы регулирования для дизеля трактора "Универсал-445", работающего на сжатом природном газе и оборудованного распределительным насосом роторного типа

Для реализации условий по конвертации дизеля ЗЧ 9,5/10,0 для работы на природном газе была разработана система регулирования, принципиальная схема которой для распределительного насоса типа САУ-ДРАМ представлена на рис. 5.2.

Система регулирования работает следующим образом. При эксплуатации трактора на ДТ подача его регулируется педалью 1 управления подачей ДТ, через тягу 18. При этом рычаг 14 подачи топлива (поворота дросселя) может перемещаться от болта 15 регулировки максимальной частоты вращения до болта 13 регулировки минимальной частоты вращения.

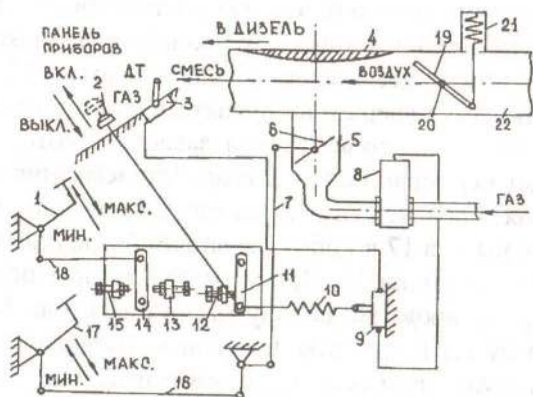


Рис. 5.2. Принципиальная схема системы регулирования дизеля ЗЧ 9,5/10,0 с распределительным насосом роторного типа CAV-DRAM трактора "Универсал-445":

1 - педаль управления подачей ДТ; 2 - ручка включения запальной дозы ДТ; 3 - выключатель подачи газа; 4 - смеситель; 5 - дозатор газа; 6 - газовая заслонка; 7 - тяга; 8 - клапан; 9 - концевой выключатель блокировки; 10 - пружина; 11 - рычаг выключения дозирующего клапана; 12 - болт регулировки запальной дозы ДТ; 13 - болт регулировки минимальной частоты вращения; 14 - рычаг подачи топлива (дросселя); 15 - болт регулировки максимальной частоты вращения; 16 - тяга; 17 - педаль управления подачей газа; 18 - тяга; 19 - заслонка воздушная; 20 - ось заслонки; 21 - пружина; 22 - пневмомеханический ограничитель максимальной частоты вращения

Для перевода дизеля ЗЧ 9,5/10,0 для работы на природном газе необходимо включить тумблер 3 выключателя подачи газа и вытащить ручку 2 включения запальной дозы ДТ. При этом рычаг 11 выключения дозирующего клапана упрется в болт 12 регулировки запальной дозы ДТ и через пружину 10 замкнет контакты концевой выключателя 9. Электромагнитный клапан 8 включится и откроет доступ газа в дозатор 5. Для регулирования подачи газа в смеситель 4 необходимо перемещать педаль 17 управления подачей газа, которая в свою очередь через тяги 16 и 7 будет поворачивать газовую заслонку 6, уменьшая или увеличивая количество газа, в соответствии с режимами работы дизеля.

В данной схеме регулирования дизель ЗЧ 9,5/10,0 работает с отключенным регулятором, поскольку вилка управления дозато-

ром топлива и связанная с рычагом 11 фиксируется для обеспечения подачи запальной дозы ДТ. Поэтому возникла необходимость установки автономного ограничителя максимальной частоты вращения дизеля при работе на природном газе. В качестве такого ограничителя установлен пневмомеханический ограничитель 22, установленный на впускном трубопроводе дизеля. Ограничитель имеет заслонку 19 со смещенной осью 20, которая соединена с пружиной 21. При большом разрежении во впускном трубопроводе, возникающем при определенной частоте вращения, заслонка, преодолевая усилие пружины, перекрывает впускной трубопровод, снижая частоту вращения дизеля.

Для перевода работы дизеля на ДТ необходимо или выключить тумблер 3, или утопить ручку 2 на панели трактора. В любом случае подача газа прекратится и дизель начнет работать по дизельному циклу. Установка ручки 2 и концевой выключателя 9 блокировки повышает надежность системы регулирования из-за исключения возможности включения подачи двух топлив одновременно.

### 5.1.3. Разработка системы регулирования для дизеля самоходного погрузчика 17.92, работающего на сжатом природном газе и оборудованного распределительным насосом роторного типа

Для реализации условий по конвертации дизеля 4Ч 9,85/12,7 для работы на природном газе была разработана система регулирования, принципиальная схема которой для распределительного насоса роторного типа "Мефин" представлена на рис. 5.3.

Система регулирования работает следующим образом. При работе по дизельному процессу подача ДТ регулируется педалью 1 управления подачей топлива через тягу, скобу 21, тягу 2 и рычаг 3 подачи топлива (поворота дресселя). Газовая дрессельная заслонка 15 перемещается также в дозаторе 14, поскольку через тягу 18 и скобу 21 соединена с педалью 1. Для перевода дизеля для работы на сжатом природном газе включается тумблер 19 на панели погрузчика.

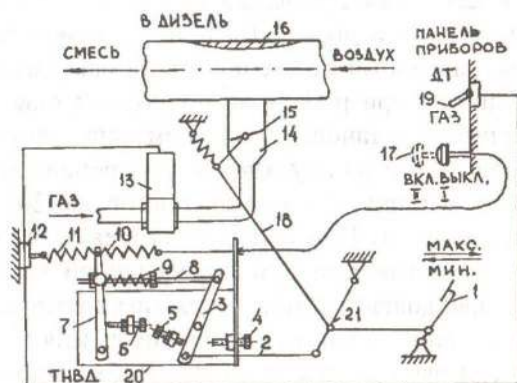


Рис. 5.3. Принципиальная схема системы регулирования дизеля 4Ч 9,85/12,7 с распределительным насосом роторного типа "Мефин" погрузчика 17.92:

- 1 - педаль управления подачей топлива; 2 - тяга; 3 - рычаг подачи топлива (дросселя); 4 - болт максимальной частоты вращения;
- 5 - болт минимальной частоты вращения; 6 - болт регулировки запальной дозы ДТ; 7 - рычаг выключения дозирующего клапана; 8 - нежесткая связь;
- 9 - пружина на сжатие нежесткой связи; 10 - пружина привода рычага выключения; 11 - пружина концевого выключателя; 12 - концевой выключатель блокировки; 13 - электромагнитный клапан подачи газа;
- 14 - дозатор газа; 15 - заслонка газовая; 16 - смеситель; 17 - рукоятка включения запальной дозы ДТ; 18 - тяга газовой заслонки;
- 19 - выключатель подачи газа; 20 - ТНВД "Мефин"; 21 - скоба связующая

Затем с помощью ручки 17 включения запальной дозы топлива через пружину 10 перемещается рычаг 7 выключения дозирующего клапана до упора в болт 6 регулировки запальной дозы ДТ. При этом сжимается пружина 9 нежесткой связи 8 и в дальнейшем поворот рычага 3 и перемещение связи 8 на изменение запальной дозы ДТ не влияют. Одновременно с поворотом рычага 7 растягивается пружина 11 и концевой выключатель 12 блокировки замыкает цепь от выключателя 19 на электромагнитный клапан подачи газа 13. Клапан откроется и газ будет подаваться в дозатор 14 и смеситель 16. Количество газа будет регулироваться заслонкой 15 через тягу 18, скобу 21 в зависимости от положения педали 1 управления подачей топлива. Для перехода обратно на ДТ необходимо или выключить тумблер 19, или переместить к

панели ручки 17, в любом случае подача газа прекратится и дизель перейдет на работу на ДТ. Установка ручки включения запальной дозы ДТ 17 и концевого выключателя блокировки предотвращает подачу в дизель двух топлив одновременно и увеличивает надежность системы питания.

## 5.2. Разработка и создание макетных образцов тракторов и самоходных погрузчиков для работы на сжатом природном газе

### 5.2.1. Разработка и создание макетного образца трактора Т-25А для работы на сжатом природном газе

В Кировском СХИ по заказу Минсельхозмаша СССР на основе хоздоговора с ЦНИИМом был разработан и изготовлен макетный образец трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. Техническая документация на трактор Т-25А представлена в работах [359, 360]. В системе регулирования подачи газа была использована система регулирования, рассмотренная в разделе 5.1.1. В соответствии с техническим заданием заказчика, макетный образец был оснащен серийной газобаллонной аппаратурой отечественного производства. Емкость газовых баллонов - 100 литров, обеспечивалась установкой двух баллонов из легированной стали. Краткая техническая характеристика макетных образцов тракторов и самоходных погрузчиков с системами питания, модернизированными для работы на сжатом природном газе и газобаллонного оборудования, установленного на них, представлены в табл. 5.1. На рис. 5.4 представлен общий вид трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. Из рисунка видно, что основные габаритные размеры трактора выдержаны. Для обеспечения этого требования баллоны закреплены под определенным углом к горизонтالي. Заправочная крестовина закреплена на баллоне на левой стороне трактора. Универсальный газовый смеситель-дозатор размещен на прямом участке впускного трубопровода и вписывается в серийное подкапотное пространство (рис. 5.5). В подкапотном пространстве также рационально компоуется двухступенчатый редуктор, размещенный между топливным баком и дизелем. Насос НД-21/2 с элек-

тромагнитным клапаном для фиксации дозатора с целью ограничения запальной дозы ДТ, также вписывается в штатную компоновку (рис. 5.6). Макетный образец трактора Т-25А прошел функциональные испытания. Трактор также демонстрировался на ВДНХ СССР и отмечен серебряной медалью.



Рис. 5.4. Общий вид трактора Т-25А с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе

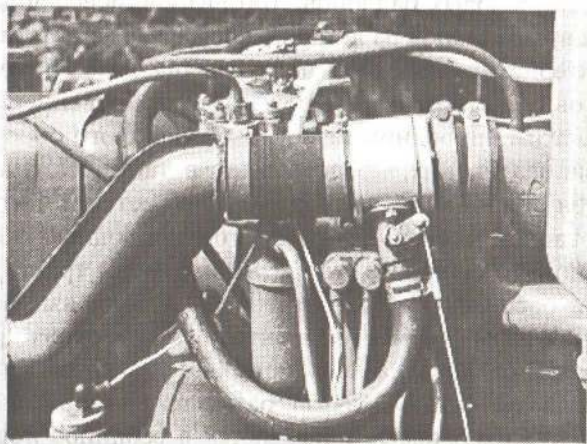


Рис. 5.5. Вид на универсальный газовый смеситель-дозатор с тягой привода трактора Т-25А

Таблица 5.1

Краткая техническая характеристика макетных образцов тракторов и самоходных погрузчиков с системами питания, модернизированными для работы на сжатом природном газе и газобаллонного оборудования, установленного на них

№ п/п	Показатель	Модель				
		Т-25А	Т-16МГ	АДД-400У1	Универсал-445	Погрузчик 17,92
1	2	3	4	5	6	7
а. Общая характеристика двигателя						
1.	Рабочий объем, л	2,08	2,08	4,16	2,34	3,90
2.	Степень сжатия	16	16	16	17	18,5
3.	Число цилиндров	2	2	4	3	4
4.	Тип камеры сгорания	полусферическая воздушная	полусферическая воздушная	полусферическая воздушная	тороидальная жидкостная	цилиндрическая жидкостная
5.	Тип системы охлаждения	воздушная	воздушная	воздушная	жидкостная	жидкостная
6.	Номинальная мощность, кВт	18,39	18,39	36,77	33,1	44,2
7.	Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1800	1800	1800	2400	2400
8.	Расход топлива на номинальном режиме, кг/ч: - природного газа - дизельного топлива	3,3 0,9	3,3 0,9	5,9 1,8	5,3 1,6	11,0 4,2
9.	Время работы при контрольном расходе газа, ч.	7	14	7	8	6



б. Газобаллонное оборудование						
1	2	3	4	5	6	7
10.	Диаметр диффузора смесителя-дозатора, мм	30	30	40	35	40
11.	Масса дополнительного оборудования, кг	168	282	275	345	440
12.	Масса одного баллона, кг	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
13.	Количество установленных баллонов, шт.	2	4	4	4	4
14.	Емкость одного баллона, л	50	50	50	50	50
15.	Максимальное рабочее давление, МПа	20	20	20	20	20
16.	Материал баллона	сталь легированная 30 ХМА				
17.	Коэффициент запаса прочности	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
18.	Наружный диаметр баллона, мм	219	219	219	219	219
19.	Длина баллона, мм	1660	1660	1660	1660	1660
20.	Объем газа в баллонах при 20 МПа, м <sup>3</sup>	20	40	40	40	40

в. Редукторы						
21.	Газовый редуктор высокого давления	БМО-80-1	БМО-80-1	БМО-80-1	БМО-80-1	БМО-80-1
22.	Двухступенчатый газовый редуктор РЗАА	111.44040-10	111.44040-10	116.44040-10	116.44040-10	116.44040-10
23.	Проходные сечения дозирующих шайб, мм: - мощностной регулировки - экономической регулировки	4,5 8,0	4,5 8,0	8,0 10,5	8,0 10,5	8,0 10,5
24.	Давление в первой ступени, МПа	0,18...0,20	0,18...0,20	0,18...0,20	0,18...0,20	0,18...0,20
25.	Рабочее давление второй ступени, Па	20...150	20...150	20...150	20...150	20...150

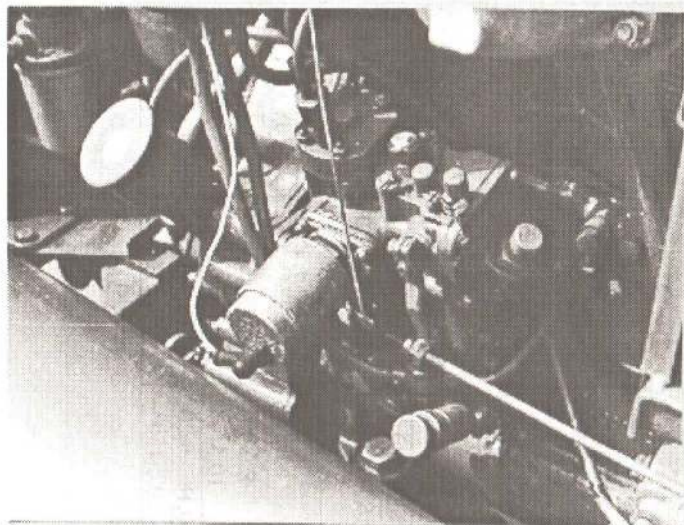


Рис. 5.6. Насос распределительного типа НД-21/2, переоборудованный для регулирования подачи природного газа

### 5.2.2. Разработка и создание макетного образца самоходного шасси Т-16МГ для работы на сжатом природном газе

По заказу совхоза "Тепличный" Ивановского АПК в Кировском СХИ был разработан и создан макетный образец самоходного шасси Т-16МГ с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. Емкость системы для сжатого природного газа по просьбе заказчика была увеличена вдвое за счет установки 4 баллонов (см. табл.5.1). Это увеличило в 2 раза возможность эксплуатации шасси без заправки природным газом. Газовые баллоны размещены на раме шасси под грузовой платформой. Два средних баллона, по соображениям компоновки, размещены под некоторым углом к горизонтали. При этом незначительно уменьшился дорожный просвет шасси. Общий вид самоходного шасси Т-16МГ с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе, представлен на рис.5.7. Самоходное шасси демонстрировалось на ВДНХ СССР и отмечено серебряной медалью.



Рис. 5.7. Общий вид самоходного шасси Т-16МГ, переоборудованного для работы на сжатом природном газе

### 5.2.3. Разработка и создание макетного образца сварочной установки АДД-4002У1 для работы на сжатом природном газе

На основе хоздоговора с ЦНИИМом был разработан газодизель Д-144 и на его базе был создан макетный образец сварочной установки АДД-4002У1 для работы на сжатом природном газе. Документация по созданию газодизеля Д-144 представлена в работе [361]. Система регулирования и дозирования, а также работы по доводке впускного трубопровода, изложенные выше, были полностью реализованы в данной установке. Сварочная установка оборудовалась серийной газобаллонной аппаратурой с четырьмя газовыми баллонами. Вид сварочной установки АДД-4002У1 с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе, представлен на рис. 5.8. В связи с тем, что оптимизированный впускной трубопровод имеет центральное расположение впускного патрубка, пришлось изменить форму впускного трубопровода, подводящего воздух из воздухоочистителя (рис. 5.9). Органы управления газовым оборудованием размещены на штатном месте в подкапотном пространстве (рис. 5.10). Здесь же, на блоке цилиндров, закреплен двухступенчатый

редуктор. Сварочная установка АДД-4002У1 прошла функциональные испытания. Она также демонстрировалась на ВДНХ СССР.

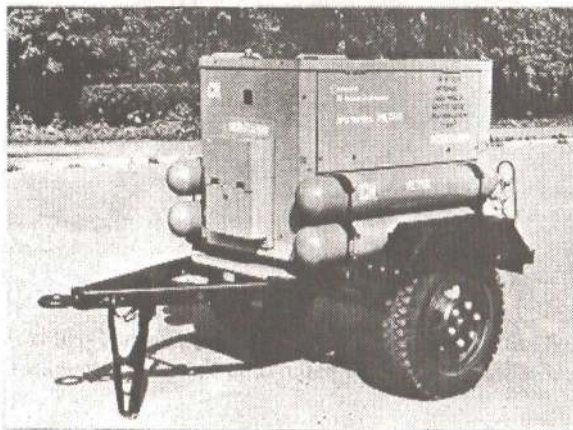


Рис. 5.8. Общий вид сварочной установки АДД-4002У1 с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе

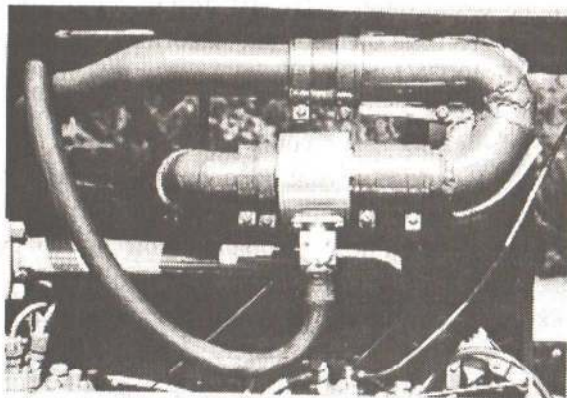


Рис. 5.9. Вид на универсальный газовый смеситель-дозатор сварочной установки АДД-4002У1

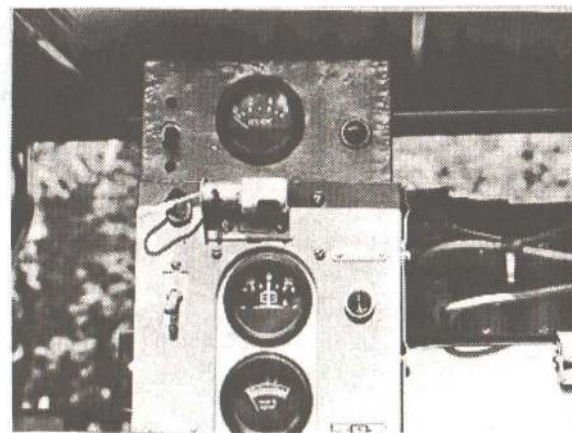


Рис. 5.10. Вид на органы управления газовым оборудованием сварочной установки

#### 5.2.4. Разработка и создание макетного образца трактора "Универсал-445" для работы на сжатом природном газе

На основании хоздоговора с совхозом "Тепличный" Ивановского АПК в Кировском СХИ был создан макетный образец трактора "Универсал-445" с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе.

Техническая документация на макетный образец трактора представлена в работе [362]. Система регулирования, установленная на тракторе, представлена выше в разделе 5.1.2. На тракторе смонтированы четыре газовых баллона.

В связи с тем, что трактор должен эксплуатироваться в теплицах, у него установлена минимальная дорожная колея, при которой газовые баллоны существенно выходят за габаритные размеры трактора.

Вид сбоку на трактор "Универсал-445" с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе, представлен на рис. 5.11. Вид на педаль управления подачей газом представлен на рис. 5.12. Газовый смеситель-дозатор, двухступенчатый редуктор и ограничитель максимальной частоты вращения вписываются в штатное подкапотное пространство.

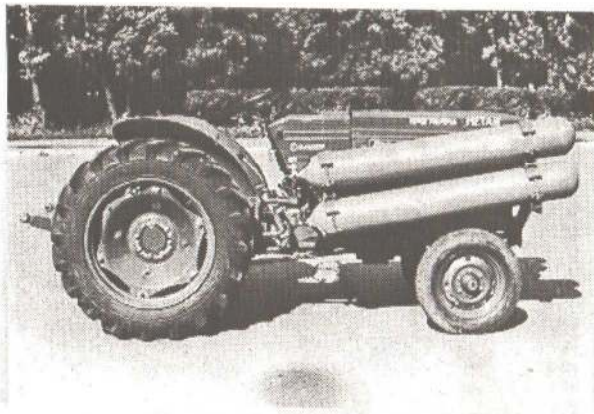


Рис. 5.11. Вид сбоку на трактор "Универсал-445", переоборудованный для работы на сжатом природном газе

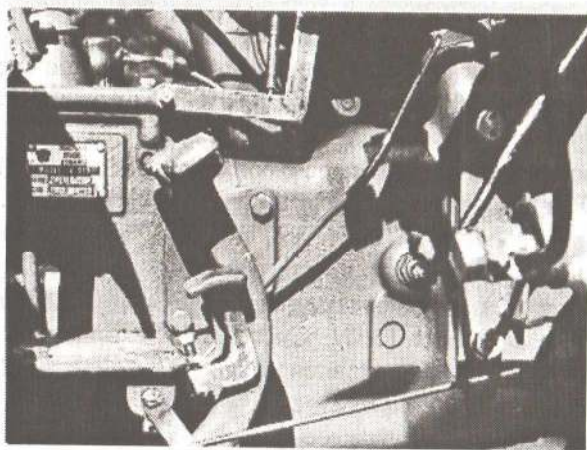


Рис. 5.12. Вид на педали управления подачей ДТ и природным газом трактора "Универсал-445"

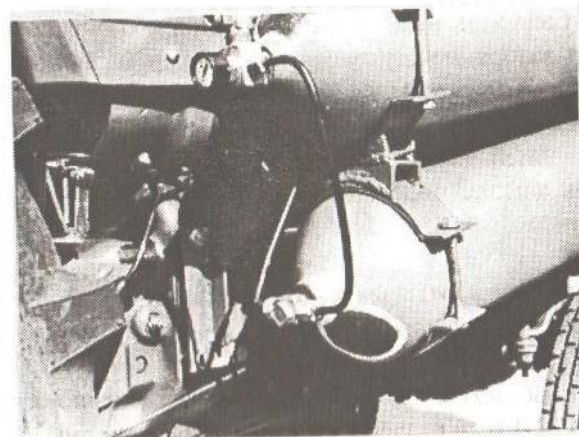


Рис. 5.13. Вид на заправочную крестовину и крепление баллонов трактора "Универсал-445"

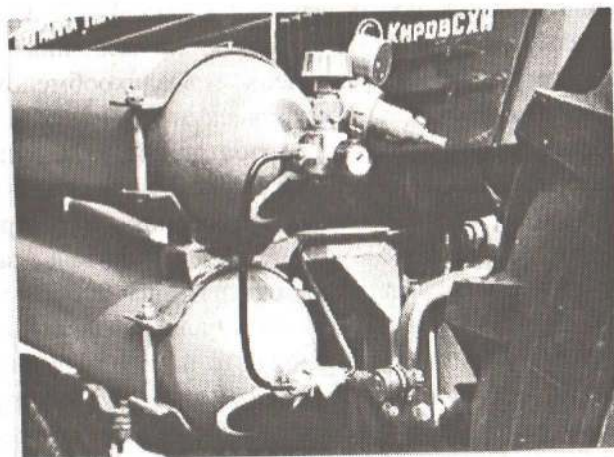


Рис. 5.14. Вид на редуктор высокого давления трактора "Универсал-445"

Заправочная крестовина располагается с правой стороны трактора (рис. 5.13). Здесь же располагается манометр высокого давления газового оборудования. Редуктор высокого давления газовой системы трактора расположен с левой стороны (рис. 5.14).

Крепление баллонов выполнено сдвоенным, с обеспечением необходимого зазора между баллонами. Сами баллоны несколько наклонены к горизонтали. Кронштейны креплений баллонов монтируются на корпусные сборочные единицы трактора в передней и средней частях. Трактор прошел функциональные испытания. Он демонстрировался на ВДНХ СССР и отмечен серебряной медалью.

#### 5.2.5. Разработка и создание макетного образца погрузчика 17.92 для работы на сжатом природном газе

На основе хоздоговора с заводом "Электробытприбор" в Кировском СХИ был разработан и создан самоходный погрузчик 17.92 с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе. Система регулирования погрузчика представлена в разделе 5.1.3. Техническая документация на разработанный погрузчик представлена в работе [363]. Погрузчик 17.92 предназначен для работы в складских помещениях и заводском сборочном корпусе с ограниченным воздухообменом и предусматривал, в соответствии с техническим заданием, установку в системе выброса отработавших газов дизеля каталитического нейтрализатора Н-23. При разработке конструкции крепления газовых баллонов были учтены требования к погрузочно-разгрузочным самоходным устройствам. Водитель защищен сложным каркасом безопасности, отделяющим его от прямого возможного действия баллонов, а сами баллоны закрыты сверху металлической пластиной от возможного падения грузов при их подъеме. Дуги безопасности закрывают газовую арматуру сзади, предотвращая ее от возможного повреждения при движении погрузчика задним ходом. Общий вид самоходного погрузчика 17.92 представлен на рис. 5.15. На нем видно, что жесткие требования по соблюдению габаритных размеров погрузчика при размещении на нем газобаллонного оборудования выполнены. На рис. 5.16 показано размещение на погрузчике каталитического нейтрализатора отработавших газов Н-23 и глушителя.



Рис. 5.15. Общий вид самоходного погрузчика 17.92, переоборудованного для работы на сжатом природном газе



Рис. 5.16. Размещение на погрузчике 17.92 каталитического нейтрализатора Н-23 и глушителя отработавших газов

Заправочная крестовина и редуктор высокого давления размещены справа на погрузчике, как показано на рис. 5.16. Ручка управления включением запальной дозы ДТ и остановка дизеля погрузчика 17.92 установлена на штатной панели приборов. Здесь же расположены манометр (контрольный) давления газа в первой ступени газового редуктора, контрольная лампа работы на газе и тумблер переключения вида топлива.

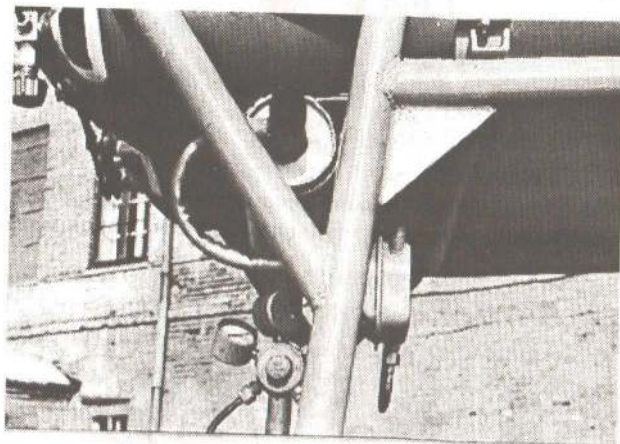


Рис. 5.17. Размещение заправочной крестовины и редуктора высокого давления на каркасе безопасности погрузчика 17.92

Сам двухступенчатый редуктор и клапан-фильтр с электромагнитом установлены в штатном подкапотном пространстве самоходного погрузчика. Смеситель-дозатор на погрузчике, из-за малого компоновочного пространства, устанавливается сразу же после воздушного фильтра на впускном трубопроводе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов Л.И., Харитонов Н.З. Охрана природы. - М.: Высшая школа, 1977. - 77 с.
2. Банников А.Г., Рустамов А.К. Охрана природы. - М.: Колос, 1977. - 92 с.
3. Никитин Л.П., Новиков Ю.В., Зарубин Г.П. Научно-технический прогресс, природа и человек. М.: Наука, 1977. - 200 с.
4. Шабад Л.М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М.: Медицина, 1973. - 368 с.
5. Гетманец Г.В., Лиханов В.А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта. - М.: Аспол, 1993. - 40 с.
6. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. - М.: Агропромиздат, 1991. - 208 с.
7. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Колос, 1994. - 224 с.
8. ГОСТ 17.2.1.01-76. Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 4 с.
9. ГОСТ 17.2.1.02-76. Охрана природы. Атмосфера. Выбросы двигателей автомобилей, тракторов, самоходных сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1980. - 8 с.
10. ГОСТ 17.2.1.03-84. Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 11 с.
11. ГОСТ 17.2.1.04-77. Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Основные термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 13 с.
12. ГОСТ 17.2.2.01-84. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 11 с.
13. ГОСТ 17.2.2.03-87. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений содержания окиси углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями. Требования безопасности. - М.: Изд-во стандартов, 1987. - 6 с.
14. ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 13 с.
15. ГОСТ 17.2.2.02-86. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения дымности отработавших газов тракторных и комбайновых дизелей. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 11 с.
16. ГОСТ 17.2.2.05-86. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами тракторных и комбайновых дизелей. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 13 с.

- 17.ГОСТ 21393 -75. Автомобили с дизелями. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений. Требования безопасности.- М.: Изд-во стандартов, 1986.-5 с.
- 18.Павлова А.П. Гигиеническая оценка условий труда трактористов и водителей в процессе усовершенствования скоростных сельскохозяйственных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- М., 1968. -18 с.
- 19.Гусева С.В. Исследование и улучшение микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- М., 1974.-18 с.
- 20.Лиханов В.А., Попов В.М. Результаты эксплуатационных испытаний тракторов Т-25А с инженерно-техническими средствами снижения токсичности и дымности отработавших газов // Исследование рабочих процессов машин в растениеводстве: Межвуз. сб. науч.тр. - Пермь, 1982. - С. 72-79.
- 21.Лиханов В.А., Попов В.М. Снижение содержания токсичных компонентов в атмосферном воздухе при эксплуатации тракторов на животноводческих комплексах // Механизация процессов в животноводстве и кормопроизводстве: Межвуз.сб. науч.тр. - Пермь, 1983. -С. 70-72.
- 22.Лиханов В.А., Попов В.М. Снижение содержания токсичных компонентов в атмосферном воздухе при эксплуатации тракторов в складах минеральных удобрений // Механизация процессов в полеводстве: Сб. науч. тр. - Пермь, 1984. -С. 85-88.
- 23.Гудерман Р. Загрязнение воздушной среды. - М.: Мир, 1979. -200 с.
- 24.Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1973. -199 с.
- 25.Смайлис В.И. Малотоксичные дизели.- Л.: Машиностроение, 1972.-186 с.
- 26.Жегалин О.И., Сайкин А.М., Френкель А.И. Методы снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей.- М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1976. -30 с.
- 27.Демочка О.И., Соколов Ю.Я. Токсичность отработанных газов двигателей автотракторного типа и средства ее снижения.- М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1974. -42 с.
- 28.Филипосянц Т.Р., Кратко А.П. Пути снижения дымности и токсичности отработавших газов дизельных двигателей.- М.: НИИНавтопром, 1973. -72 с.
- 29.Погорелов С.Д., Сайкин А.М., Френкель А.И. Методы снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей // Исследование эксплуатационных качеств сельскохозяйственных тракторов: Тр. Кишинев. с.х. ин-та.- Кишинев, 1977. -С.60-66.
- 30.Перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо / Под ред. Д.Н.Вырубова.-М.: Машгиз, 1946. -239 с.
- 31.Перевод нефтяных двигателей на газообразное топливо / Под ред. Я.И.Кеймаха, Ф.А.Парфентьева.- М.: Машгиз, 1946. -252 с.

- 32.Равкинд А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели. - М.: Недра, 1976. -196 с.
- 33.Генкин К.И. Газовые двигатели.- М.: Машиностроение, 1977.-196 с.
- 34.Коллеров Л.К. Газовые двигатели поршневого типа.- Л.: Машиностроение, 1968. -247 с.
- 35.Самоль Г.И., Гольдблат И.И. Газобаллонные автомобили.- М.: Машгиз, 1953. -285 с.
- 36.Самоль Г.И., Гольдблат И.И. Газобаллонные автомобили.- М.: Машгиз, 1963. -387 с.
- 37.Генкин К.И., Аксенов Д.Т., Струнге Б.Н. Газовые двигатели ГД-100 и агрегаты на их базе.- Л.: Недра, 1970. -238 с.
- 38.Стопалов С.Г. Газобаллонные тракторы и комбайны.- М.: ВИМ, 1964.-63 с.
- 39.Природный газ в двигателях / А.П.Кудряш, В.В.Пашков, В.С.Маринин, Д.А.Москаленко.- Киев: Наукова думка, 1990. -200 с.
- 40.Боксерман Ю.И., Мкртычан Я.С., Чирков К.Ю. Перевод транспорта на газовое топливо.- М.: Недра, 1988. -196 с.
- 41.Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г.Гайнуллин, А.И.Гриценко, Ю.Н.Васильев, Л.С.Золотаревский.-М.:Недра,1986. -237 с.
- 42.Разработка и исследование системы питания и регулирования газодизеля ЯМЗ-240ГД / К.Е.Долганов, В.С.Вербовский, Г.В.Кулич, С.Б.Кубенко // Химическая технология.-1988. -№ 5. -С.13-15.
- 43.Разработка и исследование системы питания и регулирования газодизеля ЯМЗ-240Н1-ГД / К.Е.Долганов, В.С.Вербовский, А.И.Пятничко, С.Б.Кубенко / Химическая технология.-1989.-№6.-С.45-47.
- 44.Гуревич Н.А., Аксенов В.Л., Куц В.П. Сравнение экологических показателей дизельного и газодизельного двигателей // Химическая технология. - 1988.-№ 5. -С. 8-13.
- 45.Газобаллонный БелАЗ / К.Е.Долганов, Н.Е.Основенко, А.И.Пятничко и др. // Промышленный транспорт. -1988. -№ 5. -С. 12-13.
- 46.Газобаллонный трактор / Н.Е.Основенко, Ю.В.Сиянко, А.Е.Попов, А.Э.Гмза // Тракторы и сельхозмашины. -1992. -№ 10-12.- С.25-27.
- 47.Газодизельные автомобили КамАЗ моделей 53208, 53218, 53219, 54118, 55118, 53217: Дополнение к руководству по эксплуатации автомобилей КамАЗ-5320 // Под ред.Д.Х.Валева. - М.: Машиностроение, 1988. -60 с.
- 48.Whitehouse H.D. Advances in British dual fuel and gas engines // Diesel Eng. and Esers Assoc.- 1973.- № 353.- P.1-11.
- 49.Witzky Julius E. Ein schichtgelanderer Gasmotor // MTZ.- 1974.- №8.- P. 251-254.
- 50.Дизели: Справочник.3-е-изд. / Под ред. В.А.Ваншейдта, Н.Н.Иванченко, Л.К.Коллерова. - Л.: Машиностроение, 1977. -480 с.
- 51.Chen T.N., Alford R.N. Combustion characteristics of large gas engines // Pap.ASME.- 1971.- P.6-8.

52. Silzer participation in ZNG transport systems // Shipp. World and Ship-Build.- 1974.- V.167.- № 3889.- P.144-146.
53. Daugas M. Pielstick tests on afb biogas diesels give promising results // Mod.Power Syst.- 1983.- №2.- P.43-45.
54. 6LG32X marine gas diesel developed by Fuji Diesel // Zosen.- 1982.- №4.- P.32-33.
55. Natural gas will fuel bulk carrier // Mot. Ship.- 1980.- № 725.- P.35.
56. Gasmotorenautrub? // Schiff-Ing.- 1982.- № 161.- P.41-42.
57. NKK proposes dual fuel diesel LNGC with religuefaction // Mot. Ship.- 1985.- № 777.- P. 33-35.
58. Vickers Jeffrey. Development of a system for methane operation in a four cylinder light duty diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser.-1983.-№ 831197.- P.39-45.
59. Ramsey David. Propane for diesel fuel system // Diesel Progr. N.Amer.- 1983.- № 3.-27 p.
60. Karim G.A., Amoozegar N. Determination of the performance of a dual fuel diesel engine with the addition of various liquid fuels to the intake charge // SAE Techn.Pap.Ser.- 1983.- № 830265.- P.9.
61. Karim G.A., Amoozegar N. Examination of the performance of a Dual Fuel Diesel Engine with Particular Reference to the Presence of Some Inert Diluents in the Engine Intake Charge // SAE Techn. Pap. Ser.-1982.- № 821222.- P.8.
62. Miles J.A. Power unit modification to accomodate interruptible flow of natural gas // Trans. ASAE.- 1977.- № 3.- P. 406-407.
63. Varde K.S. Propane fumigation in a direct injection type diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser.- 1983.-№ 831354.- P.8.
64. Niemeyer Arno. Diesel-Autogasbetrieb in der Praxis // Flissiggas.- 1983.- №4.- P. 20.
65. Knock limitations of methane-air mixtures in a turbocharged dual-fuel engine / Song Y., Acker G., Schaetzle W., Brett C. // SAE Techn. Pap. Ser. -1986. - №860128. -P. 25-35.
66. Дизельный двигатель, работающий на природном газе // Мицуи дзосэн гихо. -1986.- № 1228. -С. 25-35.
67. Коллеров Л.К. О развитии газовых поршневых судовых двигателей большой мощности // Энергомашиностроение.- 1973.-№12.- С. 46-47.
68. Коллеров Л.К. Газожидкостные двигатели SEMT - "Пилстик" / Энергомашиностроение.- 1973.-№ 2.- С. 47-49.
69. Справочник (Газогенераторные тракторы и автомобили, газобаллонные автомобили, смазочные масла и горючее из древесины).- М.: ОГИЗ, Сельхозгиз, 1943. -332 с.
70. Пат. 2531658 ФРГ, МКИ 01L7/02, F 02M21/02. Steuer - und Dosiervorrichtung fur gasformige oder vergaste Brennstoffe bei Brennkraftmaschinen / Erren Rudolf Arnold (ФРГ).

71. Пат. 4098248 США, МКИ F02M21/02. Fuel regulator for a two-cycle gas engine / Todd William L. (США).
72. Заявка 7728565 Франции, МКИ F 02 D 19/02. Appareil pour la correction de l - alimentation des moteurs en carburant gazeux / Scaletti Edoardo (Франция).
73. Пат. 4170971 США, МКИ 123/119 A, F 02M 25/06. Pneumatic pressure control valve assemblej / Jamanaka Minoru, Kavabata Jasuhito (США).
74. Трегубов И.А., Васильев Ю.Н., Фомин В.П. Новый дизельно-газовый двигатель типа ЧН 26/26 // Двигателестроение.- 1980.- №7.-С.3-5.
75. А.с. 180548 СССР, МКИ F 02 M 7/18. Smesovac s promen-nym difuzoren / Nadrchal Miloslav, Pernik Vit, Perny Vladimir (ЧССР).
76. А.с. 769055 СССР, МКИ F02M 21/02. Устройство для регулирования подачи газа в газовый двигатель внутреннего сгорания / А.А. Муталибов, О.Д. Мурашов, Ю.В. Маев, Н.П. Валлер (СССР). - 3с.: ил.2.
77. А.с. 777249 СССР, МКИ F02B 43/06. Устройство для регулирования подачи газа в газовый двигатель внутреннего сгорания / А.А. Муталибов, О.Д. Мурашов, Н.П.Валлер (СССР).-3с.: ил.1.
78. А.с. 185474 ЧССР, МКИ F 02 M 13/08, F 02 M 7/10. Smesovaci zari-zeni/ Nadrchal Miloslav, Pernik Vit, Perny Vladimir (ЧССР).
79. А.с. 185475 ЧССР, МКИ F 02 M 13/08, F 02 M 7/10. Smesovac s promen-nym difuzorem / Nadrchal Miloslav, Pernik Vit, Perny Vladimir ( ЧССР).
80. Федчук В.И. Исследование эффективности смесеобразования в водородном двигателе // Двигателестроение.-1979.-№10.-С.6-9.
81. А.с. 575576 ЧССР, МКИ F 02 M 21/04. Zazizeni pro regulavani prisavani mnozstvi yzduchu spalovaciho motoru u nehoz se pouziva jako paliva plynu / Balum Frantisek, Vjezdsky Radomir, Krejcirik Tosef, Prazak Stanislav (ЧССР).
82. Заявка 2491551 Франции, МКИ F 02 M 21/04, F 02 Д 9/02. Modulateur de consommation de gas de petrole liquide / Frudelle Lonis (Франция).
83. Заявка 8104681 Франции, МКИ F02 M 21/02. Dispositiv d'alimentation en gas d'un moteur a combustion intern, dans lequel les etages de sortie sont loges dans un carter relie a la pression d'entree de la tubulure d'admission d'air / Jrvoas Gves ( Франция).
84. Пат. 4425898 США, МКИ F 02 M 21/02. Gaseous fuel-air mixtur device / Melean Kerry L. (США).
85. Пат. 204510 ГДР, МКИ F 02 M 13/08, F 02 M 21/02. Mehrfachzuspeisang fuer Gase direct in Vergaser / Valter Gert, Fuehr Bernol (ГДР).
86. Пат. 4440137 США, МКИ F 02M 21/02. Supplemental fuel supply device for I.C. engine / Lagano Thomas, Batchelos William (США).
87. Ле Пера М.Е. Требования к топливам для двигателей // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом.-1982.-№1.-С.103-105.
88. Заявка 2542378 Франции, МКИ F 02 M 21/02. Dispositiv d'alimentation en gas pour moteur a combustion interne / Marie Georges, Victor Albert (Франция).



89. Пат. 218648 ГДР, МКИ F 02 M 21/04. Triebgas -Luft -Mischeinrichtung / Irmischer Ilja, Exner Reinhard, Rude Werner, Strudinger Manfred (ГДР).
90. Лебедев С.Е. Перевод на газ бескомпрессорных четырехтактных дизелей // Перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо / Под ред. Д.Н. Вырубова.- М.: Машгиз, 1946. -С. 119-167.
91. Лебедев С.Е. Перевод на газ быстроходного четырехтактного дизеля М-17 // Перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо / Под ред. Д.Н.Вырубова.- М.: Машгиз, 1946. -С.167-180.
92. Субоч Н.И. Принципиальные схемы перевода нефтяных двигателей на газ, их описание и результат работы этих двигателей на газе // Перевод нефтяных двигателей на газообразное топливо. / Под ред.Я.И. Кеймаха, Ф.А. Парфентьева.- М.: Машгиз, 1946.- С. 7-101.
93. Хлебников Г.К. Перевод на смешанное топливо форкамерного двигателя Бенц и компрессорного Литценмейер // Перевод нефтяных двигателей на газообразное топливо. / Под ред.Я.И. Кеймаха, Ф.А.Парфентьева.- М.: Машгиз, 1946.- С. 115-161.
94. Самоль Г.И., Гольдблат И.И. Применение горючих газов в автотракторных двигателях.- М., Л.: Гостоптехиздат, 1952.-129 с.
95. А.с.731018 СССР, МКИ F02M 21/02. Система подачи газозвоздушной смеси в двигатель внутреннего сгорания / К.И.Генкин, Г.Г.Мансфельд (СССР).-3 с.: ил.2.
96. Пат. 4416244 США, МКИ F 02 B 7/02. Control system for a dual fuel internal combustion engine / Donald Ross W.(США).
97. Пат. 4463734 США, МКИ F 02 M 1/16, F 02 M 21/00. Dual fuel diesel engine / Akeroyd Richard T. (США).
98. Токсичность автотракторных двигателей и способы ее снижения / Н.П.Самойлов и др.- Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1997.-170 с.
99. Бейлин В.И., Лурье В.А. Теоретический цикл поршневого двигателя на биометане // Двигателестроение.-1996.-№2.-С.63-66.
100. Лебедев С.Е. Расчет газожидкостного процесса // Перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо / Под ред. Д.Н.Вырубова. - М.: Машгиз, 1946. -С.108-119.
101. Перспективы использования сжатого природного газа / Ф.Г.Гайнуллин, А.И.Гриценко, Ю.Н.Васильев, Л.С.Золотаревский // Газовая промышленность.-1982.-№5.-С.21-22.
102. Few O.C., Newlyn H.A. Dual fuel combustion in a turbocharged diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. -1987. -№ 871671. - 5p.
103. Pinchon Ph., Quillot B. Thermodynamic and flow analysis of indirect injection diesel combustion chamber by modelling // SAE Techn. Pap. Ser. -1985. - № 851686. - 25p.
104. Сун С., Хилл Р.С. Двухтопливный режим работы предкамерного дизельного двигателя на природном газе // Тр. Амер. общ-ва инженеров-механиков. -1985. -№ 4. -С. 60-68.

105. Кудряш А.П., Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Исследования рабочего процесса газодизеля // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. - С. 75.
106. Михайлов И.Д., Шаповалов М.Э., Каграмян А.А. Экспериментальное и аналитическое определение запальной дозы дизельного топлива для осуществления газодизельного цикла // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 79.
107. Матиевский Д.Д., Свистула А.Е. Исследование системы питания дизеля для работы на газообразном и жидком топливе // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз.науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 80.
108. Фучкин С.В., Гадаев С.А., Иванов Ю.В. Совершенствование системы газового питания 8-цилиндрового автомобильного газодизеля размерностью 12/12 с целью улучшения его показателей // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл.Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. -С. 82.
109. Строков А.П., Киктенко В.В., Красников Н.С. Особенности регулирования топливного насоса газодизеля // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл.Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 89.
110. Долганов К.Е., Сиянко Ю.В. Переоборудование автомобильных дизелей ЯМЗ-236,-238 в газодизели // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 76-77.
111. Долганов К.Е., Вербовский В.С., Кубенко С.Б. Перевод на газодизельный процесс двигателей ЯМЗ-240,-240Н // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. -С. 78.
112. Ретота Н.Г., Фучкин С.В. Оценка токсичности автомобильного газодизеля с измененной характеристикой цикловой подачи запального дизельного топлива // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 81.
113. Чертков Я.Б. Моторные топлива.- Новосибирск: Наука, 1987.-206 с.
114. Чертков Я.Б. Современные и перспективные реактивные и дизельные топлива.- М.: Химия, 1968.-356 с.
115. Скотт У.М. Новые виды топлива для автомобильных дизелей // Перспективные автомобильные топлива: Пер. с англ. -М.: Наука, 1982. - С. 223-248.
116. Смаль Ф.В., Арсенов Е.Е. Перспективные топлива для автомобилей. - М.: Транспорт, 1979. -151 с.

117. Кратко А.П., Филиппов Т.Р. Перспективы автомобильных газодизелей // Автомобильная промышленность.-1994.-№2.-С.9-10.
118. Гуляев С.А. Сжатый газ как моторное топливо // Автомобильная промышленность.-1995.-№2.-С.28-30.
119. Кутенев В.Ф., Свиридов Ю.Б. Экологические проблемы автомобильного двигателя и путь оптимального решения их // Двигателестроение.-1990.-С.55-62.
120. Свиридов Ю.Б., Тихонов Ю.В. Проблемы смесеобразования и сгорания в двигателях с внешним смесеобразованием // Двигателестроение.-1988.- №10.-С.6-8.
121. Свиридов Ю.Б., Дроздовская Л.Ю. Новый способ высокоэффективного теплоотвода к текущим жидким топливам многофракционного состава (моторным топливам) // Двигателестроение.-1987.- №10.-С.3-7.
122. Свиридов Ю.Б., Скворцов В.А. Гомогенизация топливовоздушной смеси - основа прогресса ДВС // Двигателестроение.-1982.-№1.-С.3-7.
123. Свиридов Ю.Б., Скворцов В.А. Гомогенизация топливовоздушной смеси - основа прогресса ДВС (продолжение) // Двигателестроение.-1982.-№2.-С.-3-6.
124. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.:Машиностроение, 1972.-224 с.
125. Свиридов Ю.Б., Малявинский Л.В., Вихерт М.М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. - Л.:Машиностроение, 1979.-248 с.
126. Калужин С.А., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Экспериментальное исследование скоростей движения жидкой и газообразной фаз в дизельном факеле // Двигателестроение.-1980.-№7.-С.-5-8.
127. Калужин С.А., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Распределение жидкого топлива в объеме дизельного факела // Двигателестроение.-1980.-№8.-С. 6-8.
128. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп.- Л.:Машиностроение, 1990. -352 с.
129. Кукушкин В.Л., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Экспериментальное определение оптических свойств струй распыленного топлива при дизельном впрыске // Двигателестроение. - 1984. -№12. - С.12-15.
130. Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В.Астахов, В.И.Трусов, А.С.Хачиян и др. - М.:Машиностроение, 1972. - 367 с.
131. Лышевский А.С. Системы питания дизелей. - М.: Машиностроение, 1981. - 215 с.
132. Кутовой В.А. Впрыск топлива в дизелях. - М.: Машиностроение, 1981. - 118 с.
133. Вихерт М.М., Мазинг М.В. Топливная аппаратура автомобильных дизелей. - М.: Машиностроение, 1978. - 176 с.
134. Балакин В.И., Еремеев А.Ф., Семенов Б.Н. Топливная аппаратура быстросходных дизелей. - Л.: Машиностроение, 1967. - 298 с.

135. Русинов Р.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. - Л.: Судостроение, 1971. - 224 с.
136. Свиридов Ю.Б. Принципы построения обобщенной теории сгорания в дизелях // Двигателестроение. - 1980. -№9. - С.21-23.
137. Свиридов Ю.Б. Принципы построения обобщенной теории сгорания в дизелях // Двигателестроение. -1980. -№11. - С.10-15.
138. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. - Харьков: Высшая школа, 1980. - 169 с.
139. Свиридов Ю.Б., Гриншпан А.З., Романов С.А. О расчете испаряющегося дизельного факела // Тр.ЦНИТА. -1977. - Вып.69. - С.3-12.
140. Файнлейб Б.Н., Бараев В.И. Повышение эффективности смесеобразования в дизелях путем воздействия на динамику распыленной струи топлива // Двигателестроение. -1986. -№9. - С.8-12.
141. Семенов Н.Н. Цепные реакции. - Л.: ОНТИ, Госхимтехиздат, 1934. - 555 с.
142. Семенов Н.Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения. - М.: Знание, 1969. - 95 с.
143. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. - М.: Изд-во АН СССР, 1958.-685 с.
144. Кондратьев В.Н. Свободные радикалы - активная форма вещества. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 54 с.
145. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. - М.: Наука, 1974. - 558 с.
146. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах.- М.:Изд-во АН СССР, 1960.-427 с.
147. Малов Р.В. Механизм воспламенения низкоцетановых дизельных топлив // Автомобильная промышленность. -1994. -№10. - С.11-14.
148. Прошкин В.И. О химических превращениях в углеводородных топливах при сгорании в дизелях // Двигателестроение. -1990. -№2. -С.58-59.
149. Горак В.В. Расчет цикла ДВС на основе химической кинетики // Двигателестроение. -1990. -№4. - С.14-16.
150. Красовский О.Г., Матвеев В.В. Численное моделирование рабочего процесса дизелей, газовых двигателей и газодизелей // Двигателестроение.-1990. -№11. - С.11-13.
151. Штерн В.Я. Механизм окисления углеводородов в газовой фазе. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. -496 с.
152. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. - М.: Химия, 1977.-320 с.
153. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива. - М.: Наука, 1971. - 272 с.
154. Гаврилов Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. -190 с.

155. Магарил Р.З. Механизм и кинетика гомогенных термических превращений углеводородов. - М.: Химия, 1970. - 224 с.
156. Лушпа А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. - М.: Машиностроение, 1981. - 240 с.
157. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. - М.: Высшая школа, 1974. - 400 с.
158. Соляков В.К. Введение в химическую термодинамику. - М.: Химия, 1974. - 223 с.
159. Еремин Е.Н. Основы химической кинетики. - М.: Высшая школа, 1976. - 256 с.
160. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. - М.: Химия, 1975. - 584 с.
161. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. - Л.: Недра, 1975. - 391 с.
162. Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. - Л.: Энергия, 1968. - 204 с.
163. Сжигание горючих газов в топочных устройствах / Н.В. Лавров, В.М. Попов, Л.И. Истомин, А.К. Шубников. - Л.: Энергия, 1966. - 269 с.
164. Друскин Л.И. Использование газа в котлах и технологических установках. - М.: Недра, 1973. - 262 с.
165. Михеев В.П. Сжигание природного газа в промышленных установках. - Л.: Гостоптехиздат, 1962. - 232 с.
166. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. - Л.: Недра, 1966. - 327 с.
167. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Физматгиз, 1960. - 715 с.
168. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. - М.: Наука, 1969. - 222 с.
169. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.
170. Ксандопуло Г.И., Дубинин В.В. Химия газофазного горения. - М.: Химия, 1987. - 240 с.
171. Броне Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1969. - 247 с.
172. Иванченко Н.Н., Семенов Б.Н., Соколов В.С. Рабочий процесс дизелей с камерой в поршне. - Л.: Машиностроение, 1972. - 228 с.
173. Иост В. Взрывы и горение в газах. - М.: Изд-во иностр. лит., 1952. - 668 с.
174. Мелькумов Т.А. Теория быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия. - М.: Оборонгиз, 1953. - 407 с.
175. Петриченко Р.М., Опосовский В.В. Рабочие процессы поршневых машин. - М.: Машиностроение, 1972. - 167 с.

176. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. - М.: Машгиз, 1960. - 409 с.
177. Вильямс Ф.А. Теория горения. - М.: Наука, 1971. - 615 с.
178. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. - М.: Наука, 1975. - 256 с.
179. Кондратьев В.Н. Кинетика химических газовых реакций. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 688 с.
180. Кондратьев В.Н. Константы скорости газозофазных реакций. - М.: Наука, 1970. - 352 с.
181. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М.: Наука, 1967. - 492 с.
182. Хинце И.О. Турбулентность. - М.: Академиздат, 1963. - 680 с.
183. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. - М.: Академиздат, 1963. - 255 с.
184. Щетинков Е.С. Физика горения газов. - М.: Наука, 1965. - 291 с.
185. Истратов А.Г., Либрович В.Б. Устойчивость пламени. - М.: Академиздат, 1966. - 208 с.
186. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
187. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва. - М.: Изд-во МГУ, 1957. - 576 с.
188. Ксандопуло Г.И. Химия пламени. - М.: Химия, 1980. - 241 с.
189. Похил П.Ф., Мальцев В.М., Зайцев В.М. Методы исследования процессов горения и детонации. - М.: Наука, 1969. - 296 с.
190. Бенсон С. Термохимическая кинетика: Пер. с англ. / Под ред. Н.С. Ениколопана. - М.: Мир, 1971. - 308 с.
191. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Кондратьева. М.: Мир, 1968. - 592 с.
192. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура. - М.: Металлургиздат, 1959. - 333 с.
193. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Ред. Н.А. Чигир. - М.: Машиностроение, 1981. - 407 с.
194. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1985. - 240 с.
195. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология смесеобразования в топливном факеле, впрыскиваемом в метановоздушную среду цилиндра газодизеля // Региональн. науч.-техн. конф. Наука-производство-технология-экология: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т.2. - С.138-140.
196. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология воспламенения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля // Региональн. науч.-техн. конф. Наука - производство - технология - экология: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т.2. - С. 140-141.
197. Кумгаи С. Горение. - М.: Химия, 1979. - 255 с.

198. Фристром Р.М., Вестенберг А.А. Структура пламени: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1969. - 363 с.
199. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Химические процессы в газах. - М.: Наука, 1981. - 321 с.
200. Тюльпанов Р.С., Михальчук С.А. Влияние параметров потока на образование окислов азота в диффузионных тубулетных пламенах метана // Физика горения и взрыва. - 1984. - №5. - С.50-55.
201. Сравнительные кинетические расчеты турбулентного горения воздушных смесей водорода и метана / В.Я.Басевич, В.П.Володин, С.М.Когарко, Н.И.Перегудов // Физика горения и взрыва. - 1986. - №3. - С.44-50.
202. Kono Seiko, Nagao Akihito, Motooka Hiroaki. Prediction of in-cylinder flow and spray formation effects on combustion in direct injection diesel engines // SAE Techn. Pap. Ser. - 1985. - №850108. - 12 p.
203. Najt Paul M., Foster Favid E. Compression-ignited homogeneous charge combustion // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - №830264. - 16 p.
204. Hoche A. Rechnerische und experimentelle Untersuchung von Elementen der Innen-Vorgänge in Dieselmotor // KFT. - 1988. - №11. - S. 332-335.
205. Few P.C., Newen H.A. Dual fuel combustion in a turbocharged diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. - 1987. - №871671. - 5 p.
206. Karin G.A., Amoozegar N. Determination of the performanse of a dual fuel diesel engine with the addition of varions liquid fuels to the in take charge // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - №830265. - 9 p.
207. Arcoumanis C., Whitelaw J.H. Fluid mechanics of internal combustion engines - a review // ATA - Ingegneria automotoristica. - 1988. - №5. - S. 354-372.
208. Reichel Stefan, Pishinger Franz, Lepperhoff Gerhard. Influence on particles in diluted diesel engine exhaust gas // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - №831333. - 14 p.
209. Alkidas A.C., Cole R.M. Gaseons and Particulate Emissions from a single -Cylinder Divided - Chamber Diesel Engine // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - №831288. - 13 p.
210. Weriberger Peter, Cartellieri Wolfgang. Fuel injection anol combustion phenomena in a high speed DI diesel engine obserwed by means of endoscopic high speed photography // SAE Techn. Pap. Ser. - 1987. - №870097. - 12 p.
211. Иванов К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводородов. - М.: Гостоптехиздат, 1949. - 192 с.
212. Гейдон А.Спектроскопия и теория горения: Пер. с англ. - М.: Издатинлит, 1950. - 308 с.
213. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1980. - 531 с.
214. Вулис Л.А. Тепловые режимы горения. - М.: Госэнергоиздат, 1954. - 288 с.

215. Натанзон М.С. Неустойчивость горения. - М.: Машиностроение, 1986. - 248 с.
216. Маркштейн Дж. Г. Нестационарное распространение пламени: Пер. с англ. - М.: Мир, 1968. - 438 с.
217. Пантакар С., Сполдинг Д. Тепло и массообмен в пограничных слоях. - М.: Энергия, 1971. - 125 с.
218. Себеси Н., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. - М.: Мир, 1987. - 590 с.
219. Пантакар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 320 с.
220. Дубровин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. - М.: Госэнергоиздат, 1962. - 253 с.
221. Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. - М.: Энергия, 1976. - 246 с.
222. Гиришфельдер Д., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: Пер. с англ. - М.: Издатинлит, 1961. - 929 с.
223. Бретшнайдер С.Т.Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. - М. - Л.: Химия, 1966. - 535 с.
224. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. - Л.: Химия, 1971. - 591 с.
225. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник: В 5 т. - М.: ВИНТИ, 1971. - Т.1. - 266 с.
226. Бартльме Ф. Газодинамика горения. - М.: Энергоиздат, 1981. - 276 с.
227. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. - М.: Химия, 1972. - 210 с.
228. Теснер П.А. Образование сажи при горении // Химия горения и взрыва. - 1979. - №2. - С.3-14.
229. О механизме начальной стадии термического распада ацетилен при высоких температурах / П.А.Теснер и др. // Химическая физика. - 1983. - №8. - С.1103-1105.
230. Изотопный состав углерода сажи из пламени метана / П.А.Теснер, Е.Я.Гаврилов, М.Г.Осипова, И.С.Рафалькес // Физика горения и взрыва. - 1984. - №4. - С.16-21.
231. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. - М.: Госэнергоиздат, 1962. - 331 с.
232. Блох А.Г. Излучение светящегося сажистого пламени // Теплоэнергетика. - 1964. - №4. - С.26-30.
233. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. - Л.: Энергия, 1967. - 326 с.
234. Блох А.Г., Модзалевская М.Л. Спектральная поглощательная способность потока частиц углерода в пламени // Теплоэнергетика. - 1970. - №10. - С.46-48.
235. Модзалевская М.Л., Блох А.Г. О влиянии спектра размеров частиц

- сажистого углерода на излучение светящегося пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - №3. - С.63-67.
236. Блох А.Г., Модзалевская М.Л., Быстров Н.Г. Радиационные характеристики полидисперсных систем частиц углерода в светящемся пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - №5. - С.37-41.
237. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 240 с.
238. Блох А.Г., Щелоков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Часть 1 // Инженерно-физический журнал. - 1990. - Т.59. - №3. - С.492-499.
239. Блох А.Г., Щелоков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Часть 2 // Инженерно-физический журнал. - 1992. - Т.62. - №6. - С.831-839.
240. Блох А.Г., Щелоков А.И. Влияние механизма пиролиза метана на излучающие свойства факела природного газа // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. третьего Минского межд. форума по тепломассообмену.-Минск,1996.-Т.2.-С.40-41.
241. Исследование эмиссионных характеристик факела при горении жидких топлив / М.В.Страдомский, Е.П.Васильев, В.И.Козленко, Е.А.Ефремова // Теплофизика и теплотехника: Респ.сб. - Киев: Наукова думка, 1975. - Вып.29. - С.18-23.
242. Радиационный теплообмен в цилиндре дизельного двигателя большой мощности / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, В.А.Асмаловский, В.С.Маляров // Теплообмен излучением и сложный теплообмен: Материалы пятой Всесоюз. конф. по тепломассообмену. - Минск, 1976. - Т.8. - С.317-321.
243. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Маляров В.С. Экспериментальное определение эмиссионных свойств пламени в циклическом рабочем процессе // Теплофизика и теплотехника: Респ.сб. - Киев: Наукова думка, 1979. - Вып.37. - С.26-30.
244. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Маляров В.С. Экспериментальное исследование закономерностей сложного теплообмена при импульсном сжигании жидкого топлива в ограниченном объеме // Теплообмен в энергетических процессах и системах: Материалы шестой Всесоюз. конф. по тепломассообмену. - Минск, 1980. - Т.8. - С.36-39.
245. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Маляров В.С. Исследование граничных условий теплообмена для ЦПГ дизеля с высоким наддувом // Двигателестроение. - 1980. - №8. - С.11-13.
246. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Исследование эмиссионных свойств пламени при импульсном сгорании жидких топлив в замкнутом объеме // Радиационный теплообмен: Тез. докл. пятой Всесоюз. науч.-техн. конф. - Ставрополь, 1982. - С.126-127.
247. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Маляров В.С. Исследование лучи-

- стого теплообмена в цилиндре дизеля // Изв.вузов: Машиностроение, 1982. - №1. - С.88-92.
248. Структура сажевых частиц при горении распыленного керосина / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, Е.А.Ефремова и др. // Пром. теплотехника. - 1984. - Т.6. - №2. - С.78-81.
249. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Коэффициент ослабления лучей потоком сажистых частиц в пламени при импульсном диффузионном сгорании жидких топлив в камере постоянного объема // Пром. теплотехника. - 1985. - Т.7. - №6. - С.60-64.
250. Динамика образования сажевых частиц в пламени при сжигании распыленного жидкого топлива / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, В.И.Козленко, Е.А.Ефремова // Пром. теплотехника. - 1985. - Т.7. - №3. - С.95-97.
251. Структура сажевых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива в прямоточной камере сгорания / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, Е.А.Ефремова, В.И.Козленко // Пром. теплотехника. - 1985. - Т.7. - №4. - С.75-78.
252. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Исследование эмиссионных свойств твердой дисперсной фазы пламени при импульсном сжигании жидких моторных топлив // Пром. теплотехника. - 1985. - Т.7. - №5. - С.85-88.
253. Экспериментальное исследование структуры сажевых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, Е.А.Ефремова, А.Г.Плита // Радиационный теплообмен в технике и технологии: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Каунас, 1987. - С.31-32.
254. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Лучистый теплообмен при импульсных режимах сгорания // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Киев, 1987. - С.84-85.
255. Максимов Е.А., Плита А.Г., Ефремова Е.А. Зависимость интенсивности лучистого теплопереноса от дисперсного состава продуктов сгорания жидкого топлива // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Киев, 1987. - С.86.
256. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Васильев Е.П. Теплообмен при импульсном сгорании жидких моторных топлив // Двигателестроение. - 1987. - №11. - С.5-7.
257. Изучение распределения сажевых частиц при сгорании распыленного жидкого топлива / М.В.Страдомский, Е.А.Максимов, А.Г.Плита, Е.А.Ефремова // Пром. теплотехника. - 1988. - Т.10. - №3. - С.84-88.
258. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Радиационный теплообмен и эмиссионные свойства полидисперсной твердой фазы факела при импульсном сжигании жидких топлив // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тез. докл. Минского межд. форума по тепломассообмену. - Минск, 1988. - С.27-29.

259. Плита А.Г., Ефремова Е.А. Теплоперенос излучением в двухфазной среде, ограниченной изотермическим цилиндром с тороидальной основой // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. второго Минского межд. форума по теплообмену. - Минск, 1992. - С.100-103.
260. Таран Э.Н. Исследование структуры плоских диффузионных пламен на встречных струях спектроскопическими и ионизационными методами // Структура газозафазных пламен: Материалы Всесоюз. семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1984. - Часть 2. - С.123-143.
261. Таран Э.Н., Шумриков В.В. О структурных особенностях плазмохимического углерода // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепропетровск, 1986. - С.137-145.
262. Таран Э.Н. Влияние азотсодержащих соединений на образование сажи при горении // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепропетровск, 1986. - С.75-86.
263. Таран Э.Н., Присняков В.Ф. Влияние внешнего электрического поля на спектр излучения и образование сажи при горении // Структура газозафазных пламен: Материалы Межд.семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Часть 3. - С.183-193.
264. Таран Э.Н., Присняков В.Ф. О природе саже // Структура газозафазных пламен: Материалы межд. семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Часть 1. - С.104-113.
265. Гордиец Б.Ф., Шелепин Л.А., Шмоткин Ю.С. Аналитическая модель сажеобразования // Физика горения и взрыва. - 1982. - №2. - С.71-76.
266. Веселов С.Н., Заклязьменский Л.А., Маркачев Ю.Е. Численное моделирование горения углерода в воздухе // Физика горения и взрыва. - 1986. - №3. - С.38-44.
267. Бахир Л.П., Жданович О.Б. Спектральная излучательная способность продуктов сгорания дизельного топлива в области спектра 2,0-5,5 мкм // Физика горения и взрыва. - 1976. - №1. - С.75-81.
268. Образование сажи при термическом разложении ацетилена в условиях ударной трубы // В.Г. Кнорре, В.И.Каменщикова, А.Г.Ляхов, Д.Т.Снегирева // Физика горения и взрыва. - 1980. - №2. - С.89-92.
269. Образование сажи при горении гомогенных гексано-воздушных смесей при давлениях до 1,5 МПа / Ф.Г.Бакиров, Н.Х.Баширов, В.М.Захаров и др. // Физика горения и взрыва. - 1982. - №3. - С.51-56.
270. Головина Е.С. О константе скорости химической реакции и коэффициенте реакционного газообмена газификации углерода // Шестой Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву: Сб. материалов. - Черногловка, 1980. - С.106-110.
271. Кинетика сажеобразования из газообразных углеводородов / В.Г.Кнорре, А.И.Прихоженко, А.Я.Дубовицкий, Г.Б.Манелис // Шестой Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву: Сб. материалов. - Черногловка, 1980. - С.75-78.

272. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А, Ложкин В.Н. Исследование температуры и излучательной способности турбулентного сажистого пламени в циклических процессах сгорания // Теплоэнергетика: Труды ЛПИ. - Л., 1977. - №358. - С.96-100.
273. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Сажевыделение в цилиндрах дизельных двигателей и дымность отработавших газов // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: Межвуз. сб. науч. тр. - Л., 1977. - С.85-91.
274. Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование динамики сажевыделения и температуры пламени на неустановившихся режимах работы дизеля ЯМЗ-238НБ // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Сб. науч. тр. - Барнаул, 1978. - С.40-53.
275. Батурин С.А., Звонов В.А., Фурса В.В. О величине локальных температур сгорания в цилиндрах дизеля // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков, 1979. - №29. - С.38-45.
276. Батурин С.А., Журавлев А.Н. К вопросу об определении степени черноты пламени в цилиндре дизеля // Проблема создания и использования двигателей с высоким наддувом. - Харьков, 1979. - С.392-394.
277. Батурин С.А., Петриченко Р.М., Степанов В.Н. Конвективный и лучистый теплообмен в цилиндре дизеля при переходных процессах // Двигателестроение. - 1980. - №6. - С.18-20.
278. Батурин С.А., Ложкин В.Н., Степанов В.Н. Методика и некоторые результаты исследования излучательных характеристик пламени автотракторного дизеля при неустановившихся режимах работы // Рабочие процессы компрессоров и двигателей внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1980. - №370. - С.48-53.
279. Батурин С.А., Сеницын В.А., Курочкин В.А. Аналитическое определение спектральной и интегральной черноты дизельного пламени // Динамическая и тепловая нагруженность и надежность работы сельскохозяйственных агрегатов. - Барнаул, 1981. - С.121-127.
280. Батурин С.А., Сеницын В.А. Математическое моделирование локального лучистого теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - №6. - С.15-18.
281. Батурин С.А., Сеницын В.А. Физические условия и определяющие показатели радиационного теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - №12. - С.14-16.
282. Математическое моделирование процессов сажевыделения и радиационного теплообмена в дизелях / С.А.Батурин, А.С.Лоскутов, В.А.Сеницын, В.А.Курочкин // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1983. - №394. - С.23-29.
283. Батурин С.А., Курочкин В.А. Критический анализ методов приближенного расчета радиационного теплообмена в дизелях // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1985. - №411. - С.48-52.

284. Батурич С.А., Макаров В.В., Лоскутов А.С. Феноменология и химизм процесса результирующего сажевыделения в дизелях // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1985. - № 411. - С.52-55.
285. Батурич С.А., Байков А.Б. Обобщенный анализ процесса сажевыделения в дизелях с впрыскиванием топлива в неразделенную камеру сгорания // Двигателестроение. - 1988. - №2. - С.8-9, 21.
286. Варшавский И.Л., Мачульский Ф.Ф. Токсичность дизельной сажи и измерение сажесодержания дизельного выхлопа // Сб.тр.ЛАНЭ. - М., 1969. - С.120-157.
287. Звонов В.А., Дядин А.П. Исследование сажевыделения в цилиндре дизеля // Сб. науч. тр. Украинской СХА. - Киев, 1977. - Вып.136. - С.77-82.
288. Гуреев А.А., Махов В.З., Ховак М.М. Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование // Автомобильные двигатели внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. - М., 1975. - Вып.92. - С.29-38.
289. Разлейцев Н.Ф. Кинетическое уравнение динамики образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. - Харьков, 1977. - Вып.26. - С.10-18.
290. Влияние типа рабочего процесса и режимов работы быстроходных дизелей на свойства сажи и отработавшие газы / М.М.Вихерт, А.П.Кратко, И.С.Рафалькес и др.// Автомобильная промышленность. - 1975. - №10. - С.8-11.
291. Гладышев А.В., Вагнер В.А., Матиевский Д.Д. Экспериментальное исследование температурно-концентрационных полей в цилиндре дизеля // Двигателестроение. - 1990. - №7. - С.3-6.
292. Миликен Р.К. Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи // Измерение температур в объектах новой техники. - М.: Мир, 1965. - С.152-172.
293. Баранов Н.А., Смайлис В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи: Тр. ЦНИДИ. - Л., 1980. - №12. - С.82-83.
294. Кузьмин В.А., Лиханов В.А., Маратканова Е.И. Методика расчета характеристик теплового излучения в камере сгорания газодизеля // Региональн.науч.-техн.конф. Наука-производство-технология-экология: Сб. материалов. - Киров, 1998. Т.2. - С.135-136.
295. Лиханов В.А. Феноменология образования сажи в цилиндре газодизеля // Совершенствование и развитие мобильной энергетики в сельском хозяйстве: Тез.докл.10-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Чебоксары, 1998. - С.134-137.
296. Лиханов В.А., Кузьмин В.А. Механизм сажеобразования в газодизеле на основе метода больших молекул // Совершенствование и развитие мобильной энергетики в сельском хозяйстве: Тез. докл. 10-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Чебоксары, 1998. - С.137-140.

297. Макаров В.В. Полициклические ароматические углеводороды - зародыши сажистых частиц // Совершенствование и развитие мобильной энергетики в сельском хозяйстве: Тез. докл.10-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Чебоксары, 1998. - С.144-146.
298. Вейблат М.Х., Федякин П.А. Снижение дымности отработавших газов форсированного дизеля на режимах холостого хода // Двигателестроение. - 1990. - №11. - С.8-10.
299. Крутов В.И., Кабанов А.А. Оценка дымности отработавших газов переходных процессов дизелей // Двигателестроение.-1988.-№3.-С.55-57.
300. Смайлис В.И., Негин С.В. Влияние динамических характеристик привода топливного насоса высокого давления на дымность отработавших газов и некоторые параметры рабочего процесса судового дизеля // Двигателестроение. - 1988. - №5. - С.47-48.
301. Katimoto Takeyuki, Osako Shuichi, Matsuoka Shin/ Air cell combustion chamber reduces diesel soot // Automot.Eng.-1983.-№9.-P.51-52.
302. Kontani Kazuo, Gotoh Shinichi. Measurement of soot in a diesel combustion chamber by light extinction method and in cylinder observation by highspeed shadowgraphy // SAE Techn. Pap.Ser.-1983.-№831291.-P.31-43.
303. Characterization of diesel particulates by mass spectrometry including MS-MS / Wood Karl, Ciupec James, Cooks Graham, Ferguson Colin // SAE Techn. Pap. Ser.-1982.- №821217.- 9 p.
304. Stark Gerhard, Krebs Stefan, Leonard Rolf. Schnellverfahren zur Bestimmung der PAK-Emissionen von Dieselmotoren und Ottomotoren in Stationarbetrieb // MTZ.-1984.-№5.-S.209-214.
305. Zierock Karl, Rothe Gertrude, Steppat Regine. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Particulate Emissions of Three Diesel Engines // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - № 830458. - 17 p.
306. Cao Jian Du, Kittelson David. Total cylinder Sampling from a diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - № 830243. - 15 p.
307. Kamimoto Takeyuki, Yokota Haryuyki, Kobayashi Haruki. Effect of high pressure injection soot formation in a rapid compression machine to simulate diesel flames // SAE Techn. Pap. Ser. - 1987. - № 871610. - 9 p.
308. Smith O.J. Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions // Progress in Energy and Combustion Science. - 1981. - № 7. - P. 275 - 291.
309. Dent J.C., Mehta P.S. Phenomenological combustion model for a quiescent chamber diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. - 1981. - № 811235. - 19 p.
310. Dent J.C., Mehta P.S., Swan J.A. Predictive model for automotive D I diesel engine performance and smoke emissions // Diesel Engines Passenger Car and light Duty Ven. Conf. London, 5 - 7 Oct. 1982. - London, 1982. - P. 237 - 245.
311. Effects of combustion and injection systems on unburnt HC and particulate emissions from a diesel engine / Murayama T., Miyamoto N., Chikan-

- sa T., Yamane K. // SAE Techn. Pap. Ser. - 1986. - № 861232. - P. 131 - 139.
312. Кривандин В.А. Светящееся пламя природного газа. - М.: Металлургия, 1973. - 136 с.
313. Смайлис В.И. Теоретические и экспериментальные основы создания малотоксичных дизелей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - Л., 1988. - 43 с.
314. Гуреев А.А., Камфер Г.М. Испаряемость топлив для поршневых двигателей. - М.: Химия, 1982. - 264 с.
315. Иващенко Н.А., Горбунова Н.А. Методика и результаты идентификации математической модели рабочего процесса дизеля // Двигателестроение. - 1989. - №4. - С. 13-15.
316. Иващенко Н.А., Горбунова Н.А. Методика и результаты математической оптимизации рабочего процесса тепловозного дизеля // Двигателестроение. - 1989. - № 5. - С. 10-12.
317. Упрощенная математическая модель выгорания топлива в цилиндре дизеля / В.А.Куцевалов, Р.М.Петриченко, В.Н.Степанов, С.Н.Уваров // Двигателестроение. - 1988. - № 8. - С. 6-8.
318. Разлейцев Н.Ф., Филипковский А.И. Математическая модель процесса сгорания в дизеле со струйным смесеобразованием // Двигателестроение. - 1990. - № 7. - С. 52-56.
319. Камфер Г.М., Семенов В.Н. Ориентация топливных факелов при различной геометрии КС дизелей с преимущественно объемным смесеобразованием // Двигателестроение. - 1985. - № 12. - С. 48-51.
320. Гальговский В.Р. Оптимизация отношения хода поршня к диаметру цилиндра и размеров камеры сгорания дизеля с непосредственным впрыскиванием. Ч. I. Управляющие факторы. // Двигателестроение. - 1990. - № 3. - С. 3-8.
321. Одинцов В.И. Метод расчета продолжительности задержки воспламенения топлива с учетом влияния конструктивных факторов // Двигателестроение. - 1990. - № 3. - С. 17-18.
322. Гальговский В.Р. Оптимизация отношения хода поршня к диаметру цилиндра и размеров камеры сгорания дизеля с непосредственным впрыскиванием. Ч. II. Формирование индикаторного и эффективного КПД при  $n = const$  // Двигателестроение. - 1990. - № 4. - С. 5-10, 16.
323. Одинцов В.И. Метод расчета продолжительности процесса сгорания в мало- и среднеоборотных ДВС с учетом влияния конструктивных факторов // Двигателестроение. - 1990. - № 4. - С. 27, 38.
324. Комплексное влияние регулировочных параметров топливной аппаратуры на основные показатели работы тракторных дизелей / А.В.Николаенко, В.Н.Ложкин, В.А.Долгушин, А.И.Фомичев // Двигателестроение. - 1990. - № 4. - С. 28,30.
325. Смайлис В.И., Быков В.Ю. Оптимизация экономических и экологических показателей дизеля ЧН 21/21 при форсировании по среднему эффективному давлению // Двигателестроение. - 1990. - № 4. - С. 45-46.

326. Камфер Г.М., Семенов В.Н. Анализ взаимосвязи диаметра камеры сгорания и интенсивности движения воздушного заряда в дизеле // Двигателестроение. - 1983. - № 10. - С. 3 - 5.
327. Удельный расход топлива дизеля с камерой в поршне при расчетной ориентации топливных струй / Г.М.Камфер, Д.И.Злотский, Н.А.Лунин, В.Н.Семенов // Двигателестроение. - 1987. - № 8. - С. 8 - 10.
328. Камфер Г.М., Семенов В.Н., Амбарцумян Г.В. Взаимосвязь движения воздушного заряда и ориентации топливных струй в дизелях // Повышение эффективности работы автомобильных и тракторных двигателей: Сб. науч. тр. МАДИ. - М., 1988. - С.23 - 36.
329. Камфер Г.М. Комплексный показатель смесеобразования для дизелей с камерой в поршне // Двигателестроение. - 1986. - № 4. - С. 1 - 6.
330. Лиханов В.А. Структура сажи, образующейся в цилиндре газодизеля // Совершенствование технологий и технических средств в сельскохозяйственном производстве: Тез. докл. науч. конф. инж. факульт. ВГСХА.- Киров, 1999. - С.60 - 62.
331. Лиханов В.А., Кузьмин В.А. Рост, коагуляция и агрегация сажевых частиц в цилиндре газодизеля // Совершенствование технологий и технических средств в сельскохозяйственном производстве: Тез. докл. науч. конф. инж. факульт. ВГСХА.- Киров, 1999. - С.67 - 69.
332. Сгорание и сажеобразование в цилиндре газодизеля. Киров, НИИСХ Северо-Востока, 2000. - 102 с.
333. В.А.Лиханов. Особенности горения дизельного топлива в цилиндре газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА.- Н.-Новгород, 2000. - С. 287 - 291.
334. В.А.Лиханов. Феноменологическая модель горения дизельного топлива, впрыснутого в МВС цилиндра газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА.- Н.-Новгород, 2000. - С. 291 - 297.
335. В.А.Лиханов. Химизм высокотемпературного окисления метана при горении в цилиндре газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА.- Н.Новгород, 2000. - С. 297 - 301.
336. Лиханов В.А. Определение некоторых показателей углеродных комплексов при горении метановоздушной среды в цилиндре газодизеля // Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России: Материалы II Международной науч.-практ. конф.: В 3 т. - Киров, 2000. - Т. 2. - С. 162 - 165.
337. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 58 с.



338. ГОСТ 20000-82. Дизели тракторные и комбайновые. Основные параметры. Общие технические требования.- М.: Изд-во стандартов, 1983. - 13 с.
339. ОСТ 23.1.440-76. Дизели тракторные и комбайновые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. - М.: ОНТИ-НАТИ, 1976. - 8 с.
340. ОСТ 23.1.441-76. Дизели тракторные и комбайновые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения.- М.: ОНТИ-НАТИ, 1976. - 8 с.
341. Лазурько В.П., Кудрявцев В.А. Программа обработки индикаторных диаграмм дизелей на алгоритмическом языке "Базисный фортран" // Тр. ЦНИДИ. - 1975. - Вып. 68. - С.38-69.
342. Единая система электронных вычислительных машин. Операционная система ФОРТРАН IV. Описание языка. Ц 51.804.001 -01Д18. -М., 1979. - 166 с.
343. Система АСГА-Т. Руководство по эксплуатации. АПИ 2.950.003РЭ. - Смоленск, 1984. - 81 с.
344. Методические указания по определению вредных веществ в отработавших газах тракторных и комбайновых дизелей. - М.: ЦНИЛТД, 1977. - 38 с.
345. А.с.1731973 СССР, МКИ F 02 M 43/00. Топливная система многотопливного дизеля / А.К.Болотов, В.А.Лиханов, С.А.Плотников (СССР) -3 с.: ил. 3.
346. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. - Л.: Наука, 1967. - 88 с.
347. Карташева А.Н. Достоверность измерений и критерии качества испытаний приборов.- М.: Изд-во ком. стандартов, мер и изм. приборов при СМ СССР. - 1967. - 160 с.
348. Кассандрова О.И., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Наука, 1970. - 104 с.
349. Свешников А.А. Основы теории ошибок. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1972. - 122 с.
350. Зажигаев Л.С., Кишнян А.А., Ромашков В.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
351. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. - М.: Колос, 1973. - 199 с.
352. Райков И.В. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - М.: Высшая школа, 1975. - 320 с.
353. Литтл Т.М., Хиллз Ф.Дж. Сельскохозяйственное дело. Планирование и анализ: Пер. с англ. - М.: Колос, 1981. - 320 с.
354. Рузинов Л.В. Статистические методы оптимизации химических процессов. - М.: Химия, 1972. - 288 с.

355. Барра Ж.Р. Основные понятия математической статистики. - М.: Мир, 1974. - 275 с.
356. Даниел К. Применение статистики в промышленном эксперименте. - М.: Мир, 1979. - 299 с.
357. А.с.1409768 СССР, МКИ F02M 21/02. Газовоздушный смеситель-дозатор для двигателя внутреннего сгорания / С.Е.Богатырев, В.А.Лиханов, В.М.Попов, А.М.Сайкин (СССР). - 3 с.: ил.3.
358. А.с.7009125 СССР, МКИ F 02Д 19/06. Система регулирования газодизеля / В.А.Лиханов, В.М.Попов, С.А.Плотников, М.Н.Хлыбов (СССР). - 3 с.: ил. 1.
359. Создание макетного образца трактора Т-25А для работы на газе в качестве моторного топлива: Отчет о НИР (промежуточный) / Киров. с.х. ин-т; Руковод. В.А.Лиханов. - №ГР 0186.0037397; Инв.№ 0288.0058370. - Киров, 1986. - 161 с.: прилож.
360. Создание макетного образца трактора Т-25А для работы на газе в качестве моторного топлива: Отчет о НИР (заключительный) / Киров.с.х. ин-т; Руковод. В.А.Лиханов. №ГР 0186.0037397. - Киров, 1987. - 57 с.: прилож.
361. Создание газодизеля Д-144 для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров.с.х. ин-т; Руковод. В.А.Лиханов. - №ГР 0188.0059777. - Киров, 1988. - 54 с.: прилож.
362. Создание макетного образца трактора "Универсал-445" для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров.с.х. ин-т; Руковод. В.А.Лиханов. - №ГР 0188.0059778. - Киров, 1990. - 65 с.: прилож.
363. Создание макетного образца погрузчика для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров.с.х. ин-т; Руковод. В.А.Лиханов.-Киров, 1991. - 68 с.: прилож.
364. Лиханов В.А. Вместо дизтоплива - природный газ // Сельский механизатор. - 1996. - №11. - С.28.
365. Лиханов В.А. Основные направления научных исследований по переводу на природный газ тракторных дизелей малой размерности // Материалы научно-практической конференции по реализации программы "Перевод автомобильного транспорта на газомоторное топливо в Чувашской Республике в 1996-2005 годах": Тез. докл. - Чебоксары, 1996. - С.57-61.
366. Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Северо-Восточного региона Европейской части России на 1997 и на период до 2000 года. - Киров, 1997. - 80 с.
367. Лиханов В.А. Мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-3900 при работе на природном газе // Технические средства для ресурсосберегающих технологий в растениеводстве и животноводстве: Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока. - Киров, 1997. - С.210-218.

368. Лиханов В.А. Основные направления стендовых исследований по переводу на природный газ тракторных дизелей малой размерности // Совершенствование технологий и технологических средств при интенсификации сельскохозяйственных процессов: Тез. докл. науч. конф. ВГСХА.- Киров, 1997. - С.33-35.
369. Лиханов В.А. Применение альтернативных топлив в тракторных дизелях // Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации агропромышленного комплекса Северо-Востока: Сб. материалов науч.-практ. конф. - Киров, 1998. - С.48-50.
370. Лиханов В.А. Разработка и исследование инженерно-технических средств охраны труда и окружающей среды путем снижения токсичности и дымности отработавших газов трактора класса 6 кН при эксплуатации на животноводческих комплексах: Дис. ... канд. техн. наук. - Киров, 1981. - 220 с.
371. Лиханов В.А. Результаты исследований работы дизелей сельскохозяйственных тракторов на сжатом природном газе // Энергосберегающие технологии и технические средства механизации животноводства Северо-Востока России: Сб. тр. науч.-практ. конф. - Киров, НИИСХ Северо-Востока, 1999. - Т.2. - С.145-152.
372. Пат. 2119078 РФ, МКИ F 02 D 19/06, F 02 M 21/02, F 02 B 69/04. Система регулирования газодизеля / С.А.Плотников, В.А.Лиханов, В.В.Наврозов, А.В.Сычов (РФ) - 4 с.: ил.2., табл.
373. Лиханов В.А., Шишканов Е.А. Результаты разработки и оптимизации смесителей-дозаторов и впускных трубопроводов тракторных дизелей при использовании природного газа // Совершенствование технических средств для механизации сельскохозяйственных процессов: Тр. НИИСХ Северо-Востока. - Киров, 2000. - С. 52 - 59.
374. Лиханов В.А. Разработка и создание семейства газобаллонных тракторов и погрузчиков для работы на сжатом природном газе // Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России: Материалы II Международной науч.-практ. конф.: В 3 т. - Киров, 2001. - Т. 3. - С. 98 - 108.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
<b>1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	9
1.1. Социально-экологические аспекты влияния автотракторных двигателей на окружающую среду	9
1.2. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения природного газа	18
1.2.1. Методы подачи природного газа в дизели	18
1.2.2. Применение природного газа в дизелях в РФ и за рубежом	20
1.2.3. Системы питания и регулирования при работе дизелей на природном газе	24
1.2.4. Влияние подачи природного газа на процесс сгорания и тепловыделение в дизелях	42
1.2.5. Влияние подачи природного газа на эксплуатационные показатели дизелей	51
<b>2. СГОРАНИЕ И САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ</b>	58
2.1. Феноменология смесеобразования, воспламенения и горения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля	58
2.1.1. Феноменология смесеобразования в топливном факеле, впрыскиваемом в метановоздушную среду цилиндра газодизеля	58
2.1.2. Феноменология воспламенения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля	66
2.1.3. Феноменология горения дизельного топлива, впрыснутого в метановоздушную среду цилиндра газодизеля	72
2.2. Феноменология, химизм и феноменологическое моделирование сажеобразования в цилиндре газодизеля	83
2.2.1. Общие воззрения на процесс сажеобразования в цилиндре газодизеля	83
2.2.2. Феноменология и химизм результирующего сажеобразования в цилиндре газодизеля	89
2.2.3. Феноменологическая модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля	106

2.3. Математическое моделирование сажеобразования в цилиндре газодизеля .....	113
2.3.1. Определение расчетной критической температуры и кинетического уравнения дегидрогенизации метана в цилиндре газодизеля .....	113
2.3.2. Определение параметра сажеобразования и основных показателей углеродных комплексов при горении МВС в цилиндре газодизеля .....	120

### 3. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИК В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....

3.1. Методики исследований по улучшению эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа .....	132
3.1.1. Методика стендовых исследований по улучшению эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа .....	132
3.1.2. Особенности методики по разработке макетных образцов тракторов с улучшенными эксплуатационными показателями тракторных дизелей для работы на природном газе .....	138
3.2. Экспериментальные установки. Приборы и оборудование .....	140
3.2.1. Экспериментальные установки для проведения стендовых исследований. Приборы и оборудование .....	140
3.2.2. Особенности экспериментальных установок, приборов и оборудования для исследования применения природного газа в тракторных дизелях .....	145
3.2.2.1. Особенности экспериментальной установки, приборов и оборудования для исследования применения природного газа в дизеле 2Ч 10,5/12,0 .....	145
3.2.2.2. Передвижной заправщик для сжатого природного газа .....	147
3.2.2.3. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 4Ч 10,5/12,0 .....	148
3.2.2.4. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 3Ч 9,5/10,0 .....	150

3.2.2.5. Особенности экспериментальной установки для исследования применения природного газа в дизеле 4Ч 9,85/12,7 .....	150
3.3. Обработка результатов исследований. Ошибки измерений .....	152

### 4. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ПРИРОДНОГО ГАЗА .....

4.1. Результаты разработки и оптимизации смесителей-дозаторов и впускных трубопроводов тракторных дизелей при использовании природного газа .....	156
4.2. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторных дизелей при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива .....	163
4.2.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива .....	163
4.2.2. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели тракторного дизеля 4Ч 10,5/12,0 при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива .....	169
4.3. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторных дизелей .....	174
4.3.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 .....	174
4.3.1.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 на различных нагрузочных режимах .....	174
4.3.1.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения .....	188
4.3.2. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели и характеристики тепловыделения тракторного дизеля 4Ч 10,5/12,0 .....	191

4.4. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа .....	195
4.4.1. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа .....	195
4.4.2. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4Ч 10,5/12,0 на различных нагрузочных и скоростных режимах путем применения в качестве альтернативного топлива природного газа .....	205
4.4.3. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 3Ч 9,5/10,00 путем природного газа .....	211
4.4.4. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4Ч 9,85/12,7 путем применения природного газа .....	219

#### **5. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТРАКТОРОВ И САМОХОДНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДЛЯ РАБОТЫ НА СЖАТОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ .....**

5.1. Разработка систем регулирования для тракторов и самоходных погрузчиков, работающих на сжатом природном газе .....	229
5.1.1. Разработка системы регулирования для дизелей тракторов, работающих на сжатом природном газе и оборудованных насосами распределительного типа .....	229
5.1.2. Разработка системы регулирования для дизеля трактора "Универсал-445", работающего на сжатом природном газе и оборудованного распределительным насосом роторного типа .....	231
5.1.3. Разработка системы регулирования для дизеля самоходного погрузчика 17.92, работающего на сжатом природном газе и оборудованного распределительным насосом роторного типа .....	233
5.2. Разработка и создание макетных образцов тракторов и самоходных погрузчиков для работы на сжатом природном газе .....	235
5.2.1. Разработка и создание макетного образца трактора Т-25А для работы на сжатом природном газе .....	235

5.2.2. Разработка и создание макетного образца самоходного шасси Т-16МГ для работы на сжатом природном газе .....	240
5.2.3. Разработка и создание макетного образца сварочной установки АДД-4002У1 для работы на сжатом природном газе .....	241
5.2.4. Разработка и создание макетного образца трактора "Универсал-445" для работы на сжатом природном газе .....	243
5.2.5. Разработка и создание макетного образца погрузчика 17.92 для работы на сжатом природном газе .....	246
ЛИТЕРАТУРА .....	249

Для заметок

**Лиханов Виталий Анатольевич**  
**ПРИРОДНЫЙ ГАЗ КАК МОТОРНОЕ ТОПЛИВО**  
**ДЛЯ ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Лицензия ЛР № 020767 от 08.04.1998 г.

Подписано к печати 31.05.02 г. Формат 60 × 84 1/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,28  
Тираж 200 экз. Заказ № 1200

Государственное издательско-полиграфическое предприятие «Вятка»  
610033, г. Киров, ул. Московская, 122