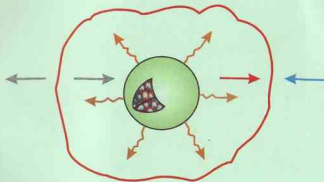


В.А. Лиханов, С.Н. Гушин

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ 24 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ  
НА МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**



Киров 2006

В.А. Лиханов, С.Н. Гушин

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ 2Ч 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ  
НА МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**

**Монография**

Под общей редакцией  
академика Российской Академии транспорта  
доктора технических наук, профессора **В.А. Лиханова**

Киров 2006

Лиханов В.А., Гушин С.Н. Исследование рабочих процессов в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метано-топливной эмульсии: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 120 с.

**Рецензенты:** заслуженный деятель науки РФ, академик Международной академии прикладных исследований, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского института ГИС МЧС России, председатель научно-экспертной Комиссии экологического контроля объектов теплоэнергетики и автотранспорта Департамента Министерства природных ресурсов по Северо-Западному региону РФ, член объединенного Совета «Экология и природные ресурсы» Санкт-Петербургского Научного Центра РАН В.Н. Ложкин; доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» М.Р. Петриченко.

Монография под общей редакцией академика Российской Академии транспорта доктора технических наук, профессора Лиханова В.А. посвящена вопросам применения метано-топливной эмульсии в качестве альтернативного моторного топлива, снижению токсичности и дымности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 (Д – 120). Рассмотрены перспективы и основные направления научных исследований по применению метано-топливных эмульсий в дизелях. Особое внимание уделено исследованию рабочих процессов в цилиндре дизеля при работе на метано-топливной эмульсии, ее влияния на процесс сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели, токсичность и дымность отработавших газов.

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

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1.  $n$  - частота вращения коленчатого вала дизеля, мин<sup>-1</sup>
2.  $p_e$  - среднее эффективное давление, МПа
3.  $N_e$  - эффективная мощность дизеля, кВт
4.  $M_e$  - крутящий момент дизеля, Н·м
5.  $G_a$  - часовой расход воздуха, кг/ч
6.  $\eta_v$  - коэффициент наполнения
7.  $G_f$  - часовой расход топлива, кг/ч
8.  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха
9.  $g_e$  - эффективный удельный расход топлива, г/кВт·ч
10.  $\eta_e$  - эффективный коэффициент полезного действия
11.  $t_c$  - температура отработавших газов, °С
12.  $\varphi$  - угол поворота коленчатого вала, градус
13.  $\Theta_{кр}$  - установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус
14.  $\tau_i$  - период задержки воспламенения
15.  $p_{z1}$  - 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.  $G_{T1}$ ,  $G_{T\Sigma}$  - часовые расходы дизельного топлива, суммарного топлива, кг/ч
23.  $NO_x$  - оксиды азота, мг/л, ppm, %
24.  $CO$  - оксид углерода, мг/л, ppm, %
25.  $CO_2$  - диоксид углерода, мг/л, ppm, %
26.  $CH_4$ ,  $C_mH_n$  - суммарные углеводороды, %
27.  $C$  - сажа, ед. по шкале Боша, %
28. ДТ - дизельное топливо
29. ОГ - отработавшие газы

30. ПЧ - цетановое число
31. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
32. КС - камера сгорания
33. КПД, к.п.д. - коэффициент полезного действия
34. в.м.т. - верхняя мертвая точка
35. н.м.т. - нижняя мертвая точка
36. ПАУ - полициклические ароматические углеводороды
37. ПДК - предельно допустимая концентрация
38. МГЭ - метанолю-топливная эмульсия
39. ССТ - спиртосодержащее топливо
40. ПАВ - поверхностно-активные вещества
41. ТА - топливная аппаратура
42. ТНВД - топливный насос высокого давления

## ВВЕДЕНИЕ

Задача экономии моторных нефтяных топлив и ограниченность сырья для их производства выдвигают на первый план необходимость поиска альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания. 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.

Всезрастающие темпы использования транспортных средств предполагают возникновение проблемы экономного и эффективного использования имеющихся ресурсов нефтяного топлива. За последние годы также значительно обострились экологические проблемы.

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 не нефтяного происхождения и имеющих улучшенные эксплуатационные показатели.

Международные обязательства России по охране окружающей среды определяют важность работ, направленных на оздоровление экологической обстановки, в первую очередь на снижение загрязнения атмосферного воздуха от вредных выбросов транспортных средств. При этом особый интерес представляют задачи одновременного улучшения экологических и эффективных показателей дизелей транспортных средств.

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 такого альтернативного топлива, как метиловый спирт (метанол), который имеет не нефтяное происхождение. Следует отметить, что использование метанола может также значительно снизить дымность и токсичность ОГ

дизелей. Это особенно важно для дизелей тракторов и энергоустановок, работающих в помещениях с ограниченным воздухообменом. Исследований же по оценке возможности применения метанола в дизелях в нашей стране недостаточно.

Важное место в исследованиях по применению в дизелях спиртовых топлив, в частности метанола, занимают работы Абрамова С.А., Азева В.С., Алейникова Ю.П., Алексеева Д.Г., Арсенова Е.Е., Баланина В.И., Виплера А.Б., Гладких В.А., Звонова В.А., Камфера Г.М., Ксенофонтова И.В., Лебедева С.Р., Лернера М.О., Лиханова В.А., Луканина В.М., Луккино В.А., Лулеевой В.В., Лытко В., Малова Р.В., Махова В.З., Носенко Н.В., Обельницкого А.М., Патрахальцева Н.Н., Плотинова С.А., Попова В.М., Попова В.П., Ратьковой М.Ю., Смаля В.Ф., Хачияна А.С. и других.

Наиболее простым, дешевым и доступным способом применения метанола в настоящее время является его использование в виде эмульсии с дизельным топливом и пакетом присадок, улучшающим ее свойства. Указанный способ позволяет в определенной степени экономить ДТ, не требует значительных затрат на внесение конструктивных изменений и дополнений в дизель и может быть реализован на двигателях, уже находящихся в эксплуатации.

В настоящее время все большее распространение получает применение присадок к топливам. Количество товарных марок присадок в мире исчисляется тысячами, и их применение становится обязательным. В России, которая в этой области отстает от наиболее промышленно развитых стран, фактически применяются лишь отдельные присадки, причем их использование не становится постоянной практикой.

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

## 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Социально – экологические аспекты влияния автотракторных двигателей на окружающую среду

Решение назревших экологических проблем в настоящее время является необходимым условием дальнейшего существования человечества. Согласно оценкам экспертов, до 75 % всех болезней человека напрямую связаны с состоянием окружающей среды и возможностью функционирования биологических связей в природе [1...4, 8].

Роль различных отраслей, использующих нефтяные топлива, в формировании вредных выбросов оценивается данными, приведенными в таблице 1.1 [5].

Таблица 1.1

Источники загрязнений атмосферы, использующие нефтяные топлива

Источники загрязнений	Доля в общем объеме выбросов, %					
	США	Великобритания	ФРГ	Франция	Италия	Япония
Промышленность (без теплоэнергетики)	17	13	35	35	30	40
Транспорт	60	60	50	23	25	35
Теплоэнергетика	14	12	12	23	15	20
Прочее	9	15	3	19	30	5

Особенно велико влияние использования жидких нефтяных топлив на транспорте. Оно эффективно при применении в двигателях внутреннего сгорания, имеет сравнительную дешевизну. Однако повышенная экологическая опасность нефтяных топлив и продуктов их сгорания в ДВС представляют собой проблему. Решение этой проблемы может быть только комплексным. Оно включает в себя разработку топлив с экологически улучшенными характеристиками, разработку экологически чистых транспортных средств и двигателей. Они должны быть оборудованы уст-

ройствами для дожига и нейтрализации отработавших газов. Должны применяться топлива и масла соответствующих марок, использоваться присадки, поддерживающие горение топлива в оптимальном режиме [6, 10, 49]. Затраты на эти мероприятия американскими экономистами оцениваются в 2200...3100 долларов США на сокращенную тонну вредных выбросов [7].

Наибольшую экологическую опасность представляет функционирование автомобильного транспорта, доля которого в загрязнении атмосферы крупных городов составляет 80...90 % и в 4...5 раз превышает загрязнение воздуха промышленными предприятиями [3, 4, 8]. Следует обратить внимание на то, что в промышленно развитых странах, таких, как Канада, Германия, Италия, Япония, Франция, Великобритания, на 1000 жителей приходится 500...600 автомобилей, в США – около 800, а в России – около 150. Следовательно, парк автомобилей в России будет неуклонно расти. Если учесть специфику автотранспорта России, где доля автомобилей со сроком службы более 10 лет составляет для легковых автомобилей – 49,6 %, для грузовых – 56,3 % а для автобусов – 45,3 %, можно сделать вывод о постоянном и всевозрастающем загрязнении атмосферы страны автотранспортом.

Глобальные выбросы вредных веществ в атмосферу Земли, связанные с процессами получения энергии за счет сжигания углеводородных топлив, по оценкам экспертов превысили 3 млрд. т/год. Выбросы в атмосферу парком эксплуатируемых дизелей составляют 4,3 млрд. т/год. Несмотря на то, что названная величина чуть более 4 % глобальных выбросов в атмосферу, исчисляемых по данным Госкомстата РФ цифрой порядка 100 млн. т/год, она весьма значительна и приблизительно равна количеству годовых выбросов 30 крупнейших городов России [8].

С ростом энерговооруженности и одновременным возможным ухудшением качества дизельного топлива (повышением содержания в нем серы), при отсутствии каких-либо мер по улучшению экологических показателей дизелей, следует ожидать ежегодного прироста валовых годовых выбросов на 12...17 %. Отработавшие газы ДВС содержат около 800 компонентов с периодом существования от нескольких минут до нескольких лет,

из которых изучено не более 200 [9, 11, 103]. Вид и объем различных составляющих в отработавших газах зависит от типа двигателя [9].

В России при правильной эксплуатации технически исправных автомобилей суммарный выброс CO, CH и NO<sub>x</sub> должен был бы составлять около 14 млн. т/год, однако на практике, по официальным данным, он на 45...50 % выше [2]. Не лучше обстоит дело и в других странах.

Опыт решения экологических проблем во всем мире позволил выработать основные пути их решения и единые требования к выбросам токсических веществ (табл. 1.2). Переход на безусловное выполнение требований указанных норм предполагается также и в России.

Таблица 1.2  
Европейские нормы выброса дизелей грузовых автомобилей, г/кВтч

Ступень	Год введения	Твердые частицы	NO <sub>x</sub>	CH <sub>4</sub>	CO
EURO 1	1993	0,36	8,0	1,10	4,5
EURO 2	1996	0,15	7,0	1,10	4,0
EURO 3	2000	0,10	5,0	0,66	2,1
EURO 4	2005	0,02	3,5	0,46	1,5
EURO 5	2008	0,02	2,0	0,25	1,5

В настоящее время в РФ действует более 30 стандартов по охране природы, в той или иной мере действующих на предприятия автотранспорта, но не многие из них регулируют токсичность двигателей [15...22, 129].

Высвобождение указанных норм позволит снизить суммарные выбросы основных вредных веществ в ОГ двигателей на 15...20 % [3, 4]. Ведутся разработки средств снижения токсичности ДВС как посредством совершенствования рабочего процесса, перевода ДВС для работы на альтернативных топливах, повышения качества применяемых топлив и смазок, так и создания систем снижения токсичности и дымности ОГ всей выпускаемой автотракторной техники. Основные методы снижения токсичности и дымности отработавших газов автотранспортных ДВС представлены в работах [1, 3, 4, 8...14, 23...28].

## 1.2 Применение эмульсий в дизелях в качестве моторного топлива

Потребление основных ископаемых топлив в мире из года в год увеличивается, в тоже время производство не может бесконечно расти из-за ограниченности запасов сырья во всем мире (рис. 1.1.) [29].

Многочисленные прогнозы [29, 30...36, 50] говорят о неуклонном уменьшении добычи нефти и использовании её главным образом для изготовления широкого ассортимента химических продуктов и т.п. Поэтому доля потребления нефтяных топлив, поставляемых флоту и наземному транспорту, будет уменьшаться, а их качество – ухудшаться. Наряду с ними будут сжигаться синтетические энергоносители [10, 27, 29, 33, 36...44, 47, 48, 69], добываемые из газа, угля и различных растений (рис. 1.2) [29].

С этой целью на современном этапе исследователями испытан целый ряд топлив из различного сырья [10, 37, 42, 52]. К сожалению, основные усилия специалистов по горению и взрыву были направлены на оптимизацию составов и процессов горения реактивных и ракетных топлив, вклад которых велик в вопросах обороноспособности страны, но ничтожно мал в загрязнении атмосферы двигателями автотранспорта.

Существуют два направления влияния на процессы сгорания топлива в автомобильных двигателях: изменение состава топлива и изменение процесса его сгорания.

Первая проблема решается путем введения в состав топлива различных добавок, улучшающих его экологические характеристики, вторая – путем введения присадок – катализаторов горения топлива. Длительное время оптимизация процесса сгорания топлива считалась главным направлением исследований. Однако развитие его ограничивается отсутствием надежных числовых методов расчета параметров самого процесса сгорания.

В качестве добавок или заменителей к дизельному топливу и бензину особое место находят кислородсодержащие соединения - оксигенаты - простые алифатические спирты (метанол, этанол) и их эфиры, в частности метилтретбутиловый эфир [10, 44].

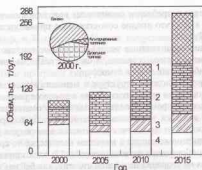


Рис. 1.1. Прогноз использования альтернативных топлив: 1 – продукты переработки по технологии GTL; 2 – спирты; 3 – биогаз; 4 – МТБЭ и др.

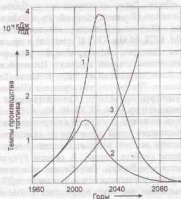


Рис. 1.2. Прогнозируемое производство жидких топлив и энергоносителей при максимальной оценке нефтяных запасов: 1 – все виды жидкого топлива; 2 – жидкое нефтяное топливо; 3 – синтетические энергоносители

Мировое потребление оксигенатов всех видов составляет 25 млн. тонн в год, что вполне сопоставимо с производством автобензина в России.

Добавки оксигенатных топлив в основное топливо позволяют улучшить процесс сгорания, а следовательно, и снизить выбросы отработавших газов в атмосферу.

При менее сложной структуре и меньших молекулах синтетических топлив во время их сгорания в процессе распада снижается количество промежуточных химических соединений, которые могут являться токсичными. Кроме того, благодаря снижению содержания углерода по отношению к водороду, в процессе сгорания спиртовых топлив в меньшем количестве по сравнению с бензином образуются оксиды углерода. По этой причине спирты во время их сгорания не в такой степени, как бензин и дизельное топливо, загрязняют воздух [52...58, 140].

За рубежом вопросами применения метанола в дизелях занимаются ведущие моторостроительные фирмы: «Рикардо» (Англия), «Джон Дир», «Катерпиллер», «Дженерал Моторс» (США), «Коматсу» (Япония), «Бурмайстер и Вайн» (Дания), «Сааб Скания», «Вольво» (Швеция), «Фольксваген», «Даймлер-Бенц», МВМ, КГД, МАН, КХД (Германия) и др., а также исследовательские центры: Миссурийский университет, Юго-Западный исследовательский институт, Иллинойский университет (США), Технологический институт г. Ахена (Германия), Институт механики Триерского университета (Италия), Йоганнесбургский университет (ЮАР), Технологический университет «Сэйбу» (Япония) и др. [3, 4, 37, 38, 40, 52...61].

В Европе развитие двигателей внутреннего сгорания в прошлом и в настоящее время стимулируют стандарты EURO, предусматривающие выпуск дизельных топлив с пакетом присадок для улучшения свойств топлив. В скором будущем подобное предполагается и в России. Разрабатываются пакеты присадок для комплексного улучшения отдельных свойств ДТ.

Использование кислорододежущих добавок в моторном топливе во многих странах мира заложено в государственные программы, предусматривающие улучшение экологической обстановки и использование в производственном цикле возобновляемых источников сырья. С этой точки зрения как нельзя лучше

подходит метанол и этанол, получаемые из растительной биомассы [13, 14] и другими путями.

Например, в Бразилии 90 % всех выпускаемых двигателей рассчитаны на применение спиртовых топлив. Аналогичные решения имеются в США, Индии и бывших союзных республиках СССР. Проекты программ типа «Этанол» разрабатываются в Белоруссии, Литве, Узбекистане, Азербайджане [13, 14, 52, 53].

Работы по применению спиртовых топлив ведутся и в России, в частности в ОАО ВНИИ НП, НАМИ (г. Москва), на ВАЗе (г. Тольятти), в Карелии, в Красноярском крае, в г. Кирове и некоторых других научных и производственных центрах.

В 2001 г. Европейская комиссия предложила государствам-участникам применять 2 % биотоплив к моторному топливу начиная с 2005 г. Далее количество биотоплив предлагается увеличивать на 0,75 % ежегодно и использовать 5,75 % от общего потребления моторного топлива к 2010 г., а в 2020 г. достигнуть уровня применения биотоплив в 20 %. При этом предъявляются более высокие требования по содержанию вредных веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания.

Существует великое множество подаций спиртов в двигатели внутреннего сгорания (рис. 1.3), но мы остановимся только на использовании эмульсий спирта и дизельного топлива.

Применение метанола в дизелях может осуществляться как в чистом виде, так и в смеси с ДТ или присадками, повышающими ЦЧ. Анализ работ показывает, что во всех случаях использования чистого метанола требуются соответствующие изменения в конструкции дизеля и источники для его принудительного воспламенения. Применение для этой цели запальной дозы ДТ можно условно считать одним из вариантов применения метанола в смеси с другими топливами и рассмотреть этот способ более подробно.

С точки зрения экономической эффективности наиболее предпочтительно использование метанола в смеси с ДТ [4, 27, 37, 42, 46, 52, 54, 63...68, 71...73, 75, 78, 79, 81, 84]. Приготовление стабильных спиртосодержащих топлив может осуществляться следующими способами: с помощью механических [54, 77, 80] или химических эмульгаторов [46, 54, 60, 76, 83, 85, 136]. Приготовление эмульсий с помощью механических эмульгаторов мо-



жет производиться в различных установках: гомогенизаторах, диспергаторах, коллоидных мельницах и т.п. Стабильность во времени получаемых при этом эмульсий метанола и ДТ очень незначительна: от нескольких минут до 1...2 часов.



Рис. 1.3. Классификация методов использования спиртов в дизелях

Наиболее предпочтительно приготовление спиртосодержащих топлив непосредственно перед впрыскиванием их в цилиндры дизеля. Технические решения этого способа на практике достаточно многообразны [87...89].

Использование химических эмульгаторов позволяет получать эмульсии с широким диапазоном изменения количества замещающего метанолом ДТ и высокой стабильностью. Стоимость таких эмульгаторов во много раз выше стоимости ДТ. В качестве эмульгаторов могут выступать высшие спирты, поверхностно-активные вещества и некоторые другие соединения.

Некоторые присадки – антидетонаторы, антиоксиданты, депрессоры – в течение нескольких десятков лет успешно применяются на нефтеперерабатывающих заводах для обеспечения выработки топлив требуемого качества. Другие вводят в топливо на нефтебазах или применяются непосредственно потребителем топлива. В большинстве случаев использование присадок представляет собой большую экономическую выгоду. Часто использование присадок является единственно возможным способом поддержания оптимального режима работы двигателя. Примером могут служить мощные присадки, применение которых предусмотрено с 1990 г. «Законом о чистом воздухе США». Использование присадок к топливу представляет широкие возможности оперативно и гибко влиять на качество топлива и процессы горения. Затраты на приобретение и введение присадок в топливо дают немедленный экологический или экономический эффект [6].

Присадки вводятся в топливо в концентрации около 0,01 %. Факультативные характеристики топлив при этом не ухудшаются, а дымность и токсичность отработавших газов, как установлено в процессе стендовых испытаний на двигателях различных типов в ведущих научных и учебных институтах страны, таких как ВНИИ НП, ЦНИДИ, ЦНИИМФ, ИХП, НАМИ, НАМИ-ХИМ, НИКТИД, НИЦИАМТ, 25 ГосНИИ МО РФ, ВИТУ, ВАТТ, ЭАИИП, ФГУП РИЦ «Прикладная химия», ООО ВНИИГидролиз, ЗАО «Академия прикладных исследований», Вятская ГСХА, снижаются на 10...70 % в зависимости от режима работы.

При испытании дизеля на эмульсии установлено, что его можно форсировать на 15...25 % по мощности без заметного

ухудшения динамических показателей и температурного состояния деталей цилиндропоршневой группы.

Продолжительные эксплуатационные испытания дизелей на эмульгированном дизельном топливе показали устойчивую работу на всех режимах; не отмечено ни одного случая зависания игл форсунок, закоксовывания сопловых отверстий распылителей и залегания поршневых колец. Износ цилиндрических втулок и поршневых колец оказался меньше, чем при работе на обычном топливе. Износ топливной аппаратуры на водо-топливной эмульсии не превышал обычного износа [44, 86].

Для повышения стабильности спиртовых эмульсий в них добавляют воду. Содержание воды в метаноле до 10 % мас. практически не влияет на расход топлива [90].

Добавление 10 % мас. воды к метанолу (содержание метанола в дизельном топливе 5 % мас.) позволяет получить эмульсию, устойчивую в течение нескольких суток и образующую при разрушении взвешенные капли метанола в дизельном топливе. Стабильность такой эмульсии можно улучшить при одновременном введении эквивалентных количеств (по отношению к метанолу) низкомолекулярных ароматических углеводородов, выкипающих ниже температуры начала кипения дизельного топлива, или использовать в качестве стабилизатора высшие спирты, в частности бутанол, или эффективные поверхностно-активные вещества. Использование бутанола экономически нецелесообразно, так как соотношение бутанол: метанол должно быть 2:1, соответственно. Введение низкомолекулярных ароматических соединений позволяет увеличить физическую стабильность смеси до 3...5 суток.

Оптимальными стабилизаторами эмульсий являются присадки: сукцинимид в сочетании с водорастворимым смачивателем, а также композиционный топливоразворающий стабилизатор, состоящий из специальной присадки к моторным маслам и присадки охлаждающей жидкости. Рекомендуемое содержание компонентов составляет 0,5 % [103].

### 1.3 Влияние метанола-топливных эмульсий на процессы впрыскивания, распыливания, смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля

#### 1.3.1 Влияние метанола-топливных эмульсий на процессы впрыскивания, распыливания и смесеобразование в цилиндре дизеля

Свойства метилового спирта, оказывающие влияние на процессы впрыскивания и распыливания, существенно отличаются от свойств дизельного топлива. Поэтому свойства спиртосодержащего топлива также будут отличаться. Это, прежде всего, относится к сжимаемости, скорости распространения волны давления, вязкости, поверхностному натяжению, давлению паров и плотности. Кроме того, для обеспечения ввода в цилиндр того же количества теплоты, что с дизельным топливом, при использовании спиртосодержащего топлива требуется увеличение его цикловой подачи [52, 54, 60, 70...72, 82, 91...98, 100, 101, 109, 111, 117].

Метанол имеет более высокую сжимаемость, чем дизельное топливо, и высокое давление паров при  $t = 38^\circ\text{C}$ . Скорость распространения волны давления, вязкость и плотность ниже, чем у дизельного топлива.

Проведены исследования впрыскивания чистого метанола [52]. При попытке впрыскивания метанола секцией базового топливного насоса высокого давления наблюдался подвыброс при всех частотах вращения. При этом объемную подачу метанола увеличивали увеличением активного хода плунжера. Также наблюдалось существенное повышение остаточного давления в топливопроводе и нестабильность давления, повышенные утечки метанола в картер насоса.

Смесеобразование эмульсий отличается от смесеобразования дизельного топлива. Рядом ученых [91, 93, 94, 99, 101] исследовалось смесеобразование эмульсий в камерах сгорания дизелей.

Эмульсия дизельного топлива и спирта, независимо от состава эмульгатора, обеспечивает совокупный положительный эффект по токсичности и экономичности дизеля, а значит, оказы-

вает положительное влияние на характер смесеобразования.

Впрыскивание дизельного топлива с добавкой воды или спирта (даже при концентрациях 10...20 %) обречает качественно другие характеристики по отношению к впрыскиванию чистого дизельного топлива. Результатом повышения гидравлических потерь при впрыскивании топливной эмульсии является меньшая, по сравнению с чистым топливом, начальная скорость истечения струи (на 30 м/с) и, соответственно, более вялое ее развитие в объеме.

Существенно повышается мощность впрыскивания эмульсии по отношению к неизменной цикловой подаче дизельного топлива в составе эмульсии и в определенной пропорции к содержанию воды или спирта.

Это приводит к резкому повышению интенсивности подачи, так что удвоенная цикловая подача (эмульсия – 50 %) впрыскивается почти за тот же период времени, что и одинарная для чистого топлива.

Повышение мощности впрыскивания (что само по себе является источником скрытых механических потерь) при переводе дизеля на легкое эмульгированное топливо обусловлено радикальным снижением гидравлических потерь в системе топливоподачи. Результатом «ликвидации» фракционных потерь при течении эмульсий дизельного топлива является резкое повышение скорости истечения из сопла распылителя, а потому и всех скоростей струи на разных этапах ее развития.

В свободной струе эмульсионного дизельного топлива также проявляются некие аномальные свойства. Так, если струя чистого топлива на длине порядка 80 мм начинает заиздавать в своем развитии от теоретической зависимости для дизеля, то струя эмульсии с содержанием воды 30 % развивается без задержки, а при содержании воды 50 % даже со значительным опережением и почти с постоянной скоростью, что возможно при вынужденном движении нераспавшейся жидкости как твердого тела. На расстоянии до 10 мм от соплового отверстия струя не распадается вовсе и движется с постоянной скоростью.

Далее происходит распад в правильный конус длиной 20...30 % мм, затем вплоть до критической длины струя под воздействием эжекционных сил стягивается в почти правильный ци-

линдр. В струе эмульсионного дизельного топлива резко возрастает устойчивость к распаду. Причем объем струи на длине радиуса камеры сгорания как косвенная характеристика глубины распада струи и ее готовности к горению во много раз меньше объема струи чистого топлива [91].

Изменение физических свойств водо-топливной эмульсии малозначимо, а наибольшим влиянием на дисперсность оказывает повышение начальной скорости струи, в результате чего следует ожидать улучшения качества распада струи при замене дизельного топлива эмульсией.

При использовании эмульгированного дизельного топлива в дизеле фактическая пристеночная доля смесеобразования существенно меньше расчетной, а большая часть достигшей стенки КС эмульсий отражается от нее в виде капель и возвращается с разной степенью заглубления в объем, повышая в нем равномерность распределения топлива и, как следствие, диффузионную скорость сгорания [91].

Затороженный пристеночный слой от низкоэнергетической части эмульсии представляет собой преимущественно мелкодисперсную систему сферических капель, контактирующих со стенкой через паровой подслои, а поэтому легко подвижных и вовлекаемых в горение.

Впрыскивание в открытую КС дизеля воды или спирта в сочетании с дизельным топливом в виде эмульсий высокой концентрации в случае изначально разбалансированного процесса объемно-племеничного смесеобразования и затянутого выгорания пристеночной доли легкого топлива сопровождается снижением и изменением структуры (активизацией) фактической пристеночной доли и более равномерным распределением объемной доли подачи, а потому и повышением скоростей выгорания этих составляющих, причем тем в большей мере, чем выше концентрация эмульгатора.

Исследование свойств эмульсий различных составов на макроуровне процессов смесеобразования в дизелях с открытой камерой сгорания позволяет сделать ряд выводов.

1. Не существует универсального механизма влияния эмульсий легких топлив на процессы смесеобразования.
2. Легкое эмульгированное топливо распадается (дисперги-

руется) в струе значительно хуже чистого топлива.

3. Процесс объемного смесеобразования на эмульсии легкого топлива носит двустадийный характер: первичного грубого распыливания в струе и вторичного (более тонкого) при упругом отражении от стенки КС.

4. Относительная значимость вторичного объемного смесеобразования возрастает по мере уменьшения размеров КС в ряде дизелей. Если капли чистых нефтяных топлив смачивают стенки открытых КС дизелей, то капли легких эмульсий не смачивают. Поэтому в случае применения легких эмульсий существенно изменяется структура пристеночного слоя, обеспечивающая ему диффузионную активность за счет резкого повышения поверхности испарения и подвижности элементов слоя, не имеющих адгезии к металлу стенки.

Таким образом, рассмотренные данные весьма противоречивы и нуждаются в проверке.

### 1.3.2 Влияние топливных эмульсий на процесс сгорания в дизелях

Проведенные ранее исследования физико-химических процессов, протекающих во время топливоподачи, испарения и сгорания эмульсий, выявили существенные особенности в характере их горения. Особенности струи эмульсий определяют процессы сгорания топлива [48, 52, 54, 60, 71, 72, 82, 91...98, 101, 115, 119...122, 124...126, 137].

В настоящее время существуют несколько гипотез о характере влияния эмульсий на процессы горения топлива. Одна из них была выдвинута В.Н. Ивановым [93, 94]. Обнаруженное явление разрыва капель эмульсии в процессе прогрева до полного их испарения и воспламенения может быть объяснено следующим образом. Эмульсия, как известно, представляет систему, состоящую из двух жидкостей с разной температурой кипения. Капля эмульсии типа «вода-в-масле» представляет собой сложную систему, состоящую из топлива, в котором равномерно в виде очень мелких частиц распределены капельки воды или спирта. Хотя, как это установлено многими исследователями, температура поверхности капли жидкости в процессе ее испарения не-

сколько меньше температуры кипения, однако разница между температурой поверхности частицы топлива и температурой кипения воды или спирта, заключенной внутри капли топлива, остается весьма существенной и достигает 60...200°C. Благодаря этому микрочастицы спирта, находящиеся внутри капли эмульсии, в процессе ее прогрева быстрее превращаются в парообразное состояние и образуют паровые пузырьки, чем та пленка топлива, которая обволакивает эти пузырьки пара. При этом пленка топлива вследствие испарения с поверхности капли непрерывно утончается по толщине.

В момент, когда давление стремящихся расширяться водяных или спиртовых паров внутри частицы превысит уже ослабленные вследствие ее нагревания силы поверхностного натяжения пленки, произойдет разрушение поверхности капли, т. е. «микровзрыв». Очевидно, чем больше разница температуры среды и температуры кипения топлива и воды (или спирта) и чем интенсивнее прогревается капля эмульсии, тем больше растет поверхность испарения и скорость превращения топливной эмульсии в парообразное состояние и тем эффективнее она разбивается.

Повышение температуры жидкой фазы в процессе испарения и горения капель свидетельствуют о последовательном фракционном испарении сначала легких, а затем более тяжелых углеводородов, имеющих, соответственно, и более высокую температуру парообразования.

Но этим не ограничивается особенность горения эмульгированных топлив. При взрыве частиц эмульгированного топлива непосредственно в КС происходит дополнительное перемешивание паров топлива с кислородом воздуха вследствие того, что они разлетаются в различном направлении. Это не только ускоряет процесс горения, но и позволяет уменьшить коэффициент избытка воздуха до минимальных размеров при той же плотности сгорания. При этом сказывается каталитическое влияние радикалов ОН на сгорание топлива, в особенности в заключительной их стадии – догорании сажистых остатков.

Необходимо отметить, что теория микровзрыва и в настоящее время находит поддержку как у отечественных, так и у зарубежных исследователей.

Проведенные эксперименты [92] с применением обратных и прямых эмульсий заставляют пересмотреть эту гипотезу. Прямые эмульсии создавались устойчивыми и обращения фаз не наблюдалось, а получаемые эффекты были эквивалентны эффектам при работе обратных эмульсий. Возможность же «микровзрывов» капли в этих эмульсиях практически исключается из-за отсутствия внутреннего водного ядра [43].

Другие авторы считают, что наличие воды в составе эмульсии увеличивает общую поверхность испарения топлива в струе обратной эмульсии, при этом изменяются скорости и испарения, и горения топлива, интенсифицирующие весь процесс сгорания [72, 73, 95].

Сопоставление результатов испытания прямых и обратных эмульсий не позволяет и эту гипотезу признать определяющей в процессах сгорания эмульсий. В этом случае процессы испарения топлива в прямых эмульсиях должны быть резко заторможены и, соответственно, результаты горения таких эмульсий были бы несопоставимы с обратными эмульсиями. Совершенно очевидно, что помимо физических факторов, характеризующих процессы впрыскивания и смесеобразования эмульсий, существуют и химические, вызванные резким увеличением количества воды в цилиндре, смешением ее паров с парами топлива.

Температурный режим процессов в КС (характерных для фронта пламени) воздействует на все компоненты паротопливо-воздушной смеси. При этом диссоциируют и вступают во взаимодействие как молекулы углеводородов и кислорода, так и молекулы азота, имеющие наиболее прочную межатомную связь. Молекулы воды при этом не могут являться исключением.

Поскольку распад углеводородов при температурах более 1500 К протекает практически мгновенно, то скорость сгорания топлива лимитируется только скоростью подвода окислителя, т. е. его диффузией.

При испарении и горении факела эмульсии молекулы углеводородов и их радикалы идеально перемешаны с парами воды. Для их взаимодействия диффузия уже не является лимитирующим фактором. В этой связи в начальный момент окисления углеводородов такой процесс представляется более вероятным, чем прямое взаимодействие с кислородом воздуха.

Скорость диффузии легких атомов водорода во много раз больше, чем у молекул кислорода и углеводородных радикалов. Образовавшийся избыток этих атомов быстро диффундирует в зону избытка кислорода, и их реакция компенсирует затраты энергии на диссоциацию воды [95].

Предварительное окисление углеводородов горячей эмульсии резко увеличивает скорость и полноту сгорания топлива. Именно этим можно объяснить резкое влияние процентного содержания воды в эмульсии на концентрацию сажевых частиц в ОГ. Сажа образуется при коагуляции продуктов глубокого крекинга углеводородов в зонах, где имеет место сильный дефицит кислорода. Присутствие паров воды и гидроксильного радикала обеспечивает предварительное окисление сажевых зародышей, что предотвращает их коагуляцию и приводит к их полному последующему догоранию.

В случае перехода от водотопливных к спиртотопливным эмульсиям имеют место следующие особенности.

Тенденция к уменьшению максимальной и средней температур заряда с увеличением содержания в эмульсиях веществ дисперсной фазы при последовательном переходе от воды к метиловому спирту ослабевает из-за разницы в теплотах парообразования. Вследствие этого увеличивается период задержки воспламенения, изменяется скорость нарастания давления, степень повышения давления при горении. Часть теплоты передается каплям дисперсной среды за период нагрева дизельного топлива до температуры равновесного испарения, вследствие чего закономерности в области малых добавок к дизельным топливам эмульгирующих компонентов корректируются из-за различия теплоемкости веществ и избыточного давления.

Тем не менее, рассмотренные данные весьма противоречивы и нуждаются в проверке. Это особенно важно, если в случае горючей фазы выступает спиртосодержащее топливо, имеющее присадки – антидетонаторы, замедляющие скорость процессов в первых фазах.

## 2 ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИСАДОК НА ПРОМОТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ

### 2.1 Воздействие присадок на промотирование процесса воспламенения метанола-топливной эмульсии в цилиндре дизеля

В качестве основных направлений улучшения свойств метанола-топливных эмульсий можно выделить следующие: увеличение присутствия метанола в дизельном топливе, улучшение эффективных показателей за счет влияния на процессы, происходящие при работе дизеля на дизельном топливе с добавкой спирта.

При этом увеличение присутствия спирта в дизельном топливе до уровня 35...40 % возможно только при одновременном воздействии на процесс сгорания в дизеле.

Известно, что по эффективности воздействия на стабильность эмульсий метанола с ДТ все присадки могут быть подразделены на несколько основных групп [107, 108].

Высшие спирты и их производные малоэффективны для метанола-топливных эмульсий.

Нефтяные сульфонаты и водорастворимые полимеры, как синтетические, так и натуральные, применимы для случаев немысокого – до 5% - содержания спирта в топливе.

Амины, аминокислоты, соли аммиосоединений в сочетании с длинноцепными полимерами высокой молекулярной массы могут использоваться для стабилизации спирто - топливных смесей, приготовляемых в системе питания дизеля.

Для приготовления высококонцентрированных эмульсий типа «вода-в-масле» достаточно перспективно применение неионогенных поверхностно-активных веществ. Введение в смесь эквивалентных количеств (по отношению к метанолу) низкомолекулярных ароматических углеводородов, кипящих ниже температуры начала кипения ДТ (например, натриевой соли дибутилового эфира сульфоянтарной кислоты), может существенно по-

высить устойчивость эмульсии [49, 83, 85, 93, 104...110].

Проведенный анализ показывает, что рост присутствия спирта в ДТ возможен за счет повышения дисперсности состава. Следовательно, в качестве возможных добавок должны быть соединения, обеспечивающие одновременно и высокие диспергирующие, и высокие эмульгирующие свойства. Подобными свойствами обладают мыла - соли некоторых жирных кислот. Это могут быть также ПАВ на основе ненасыщенных алифатических жирных кислот  $C_{16}-C_{18}$  и низких полифункциональных аминов, которые позволяют получить эмульгаторы, близкие по своей структуре к присадкам полифункционального действия.

Имеет высокие качества моюще-диспергирующая сукцинимидная присадка С-5А с химической формулой:



Однако сукцинимид не является диспергатором. Размер капель метанола-топливной эмульсии с применением С-5А велик – 10...50 мкм. Для получения повышенной дисперсности состава могут быть применены смеси мыл диэтаноламина и олеиновой кислоты.

Олеиновая кислота имеет следующие свойства: температура плавления  $T_{пл}=13^{\circ}C$ , температура кипения  $T_{кип}=225^{\circ}C$ , плотность  $\rho_{20}=0,8906 \text{ г/см}^3$ , химическая формула:



и



Диэтаноламин имеет несколько другие показатели: температура плавления  $T_{пл}=50^{\circ}C$ , температура кипения  $T_{кип}=55^{\circ}C$ , плотность  $\rho_{20}=0,7050 \text{ г/см}^3$ , теплота испарения 6,66 ккал/моль при температуре  $T=58^{\circ}C$ , химическая формула:



Диэтаноламин имеет химическую формулу:



В указанных формулах  $\text{CO}-\text{OH}$  и  $\text{NH}_2$  - свободные радикалы с невысокой (159 кДж/моль) энергией активации, инициирующие воспламенение топлива. Присадки этого типа - промоторы воспламенения, действуют только на начальной стадии процесса горения.

Интенсивный эффект промоторов вызван тем, что первичное разложение углеводорода заменяется энергетически более выгодной реакцией разложения присадки. Образование новых радикалов содействует возникновению пероксидов, которые принимают участие в дальнейшем развитии воспламенения и сокращают период задержки воспламенения.

В концентрированных эмульсиях (до 30...40 % спирта) капли спирта седиментируют в первом приближении в соответствии с [110]:

$$U = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{18 \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

где  $U$  - скорость осаждения капель диаметром  $d$ ;  
 $\eta$  - вязкость углеводородной среды;  
 $\rho_1, \rho_2$  - плотность спиртовой и углеводородной фазы;  
 $g$  - ускорение свободного падения.

Из выражения (2.1) следует, что чем меньше размер капель спирта в эмульсиях, тем меньше (в квадратичной зависимости) скорость их седиментации и тем выше седиментационная устойчивость. Если принять для эмульсии дизельного топлива со спиртом диаметр капель 2, 1 и 0,2 мкм, то скорость седиментации капель составит, соответственно, 2, 0,5 и 0,02 см/сутки. Капли спирта размером менее 0,1 мкм практически не седиментируют вследствие их интенсивного теплового движения.

Размер капель спирта в эмульсии должен определяться, по

крайней мере, тремя факторами [109, 110]: межфазным натяжением на границе спирт - углеводород, типом и количеством ПАВ, а также устройством для диспергирования. Если учесть, что высокая стабилизация эмульсии относительно коалесценции возможна только в случае создания на поверхности капли насыщенного мономолекулярного слоя ПАВ, то можно приблизительно подсчитать, сколько ПАВ-стабилизатора необходимо для получения эмульсии заданной дисперсности и седиментационной стабильности (принимая во внимание, что межфазное натяжение и диспергирующее устройство отвечают заданным требованиям).

Расчеты показывают, что при  $d = 1$  мкм и концентрации метанола в эмульсии 40 % об. поверхность раздела спирт-углеводородное топливо составит  $60 \text{ см}^2$  в  $10 \text{ см}^3$  эмульсии. Если принять площадь, занимаемую одной молекулой ПАВ в насыщенном адсорбционном слое,  $50 \times 10^{-4} \text{ см}^2$  и молекулярную массу ПАВ около 500 (характерная величина для синтетических низкомолекулярных ПАВ), то для покрытия такой поверхности раздела понадобится  $0,1 \times 10^{-4} \text{ кг}$  ПАВ, что соответствует концентрации  $\approx 0,1$  %. При уменьшении размера капель необходимое количество ПАВ возрастает (увеличивается удельная поверхность раздела метанол-дизельное топливо) обратно пропорционально диаметру капель.

Проведенный расчет показывает, что для создания метанол-топливных эмульсий, стабильных в течение недели, необходимо большой расход эмульгатора (десятые доли процента), а это маловероятно.

Если размер капель порядка 0,1 мкм и менее, при концентрации спирта 30...40 % минимальный расход ПАВ составит несколько процентов, а капли спирта практически не будут седиментировать, и система остается стабильной некоторое время.

Принимая во внимание, что механический диспергатор обеспечивает размер капель метанол-топливной эмульсии около 2...5 мкм, нетрудно подсчитать, что стабильность составит несколько часов при расходе эмульгатора 1...2 %.

Следовательно, смеси мыл диэтаноламина и олеиновой кислоты могут явиться в этом случае эффективными диспергаторами метанол-топливной эмульсии.

Повышенная дисперсность состава метанолю-топливной эмульсии, без сомнения, окажет влияние на протекание процесса сгорания в дизеле, поэтому рассмотрим закономерности протекания химических реакций.

Химическая кинетика процесса сгорания описывается известным уравнением:

$$W = Z_{AB} \cdot \left( \frac{-1}{-E_{AB}/RT} \right), \quad (2.2)$$

где  $E$  – эффективная энергия активации, кДж/моль;

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – температура воздуха в цилиндре в момент впрыскивания, К.

Как известно, скорость химической реакции равна числу эффективных столкновений между молекулами А и В за секунду в единице объема:

$$W(T) = A(T) \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot n_A \cdot n_B = Z_{AB} \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2.3)$$

где  $Z_{AB}$  – число столкновений;

$n_A$  – число молекул А;

$n_B$  – число молекул В;

$A$  – предэкспонент.

При этом число столкновений можно определить, как

$$Z_{AB} = \sigma_{AB} \cdot V_{AB} \cdot n_A \cdot n_B, \quad (2.4)$$

где  $\sigma_{AB}$  – сечение столкновений молекул А и В с размерами, соответственно,  $r_A$  и  $r_B$ ;

$V_{AB}$  – средняя относительная скорость.

Средняя относительная скорость  $V_{AB}$  равна:

$$V_{AB} = \left( \frac{8 \cdot kT}{\pi \cdot m_{AB}} \right)^{1/2}, \quad (2.5)$$

где  $m_{AB}$  – приведенная масса, определяемая по формуле:

$$\frac{1}{m_{AB}} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B}. \quad (2.6)$$

По определению, константа скорости химической реакции  $k(T)$  равна:

$$k(T) = A(T) \cdot e^{-\frac{E}{RT}} = \frac{Z_{AB}}{n_A \cdot n_B} \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (2.7)$$

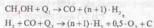
Учитывая соотношение (2.3), предэкспоненциальный множитель  $A(T)$  равен:

$$A(T) = \sigma_{AB} \cdot V_{AB}. \quad (2.8)$$

Увеличение дисперсности состава метанолю-топливной эмульсии ведет к снижению среднего размера частиц топлива. После прохождения заряда впрыскиваемого топлива через фазу деструкции также уменьшается и средний размер молекул, вследствие этого должно резко уменьшиться и сечение  $\sigma_{AB}$  (2.4), а стало быть, возможно, снижение и самой константы скорости реакции уравнения (2.7, 2.8). В результате можно ожидать некоторое увеличение времени предпламенных процессов в сравнении со случаем применения топлива, не содержащих диспергирующих добавок.

Введение отличной от дизельного топлива по физико-химическим свойствам метанолю-топливной эмульсии в цилиндры дизеля должно изменить химическую кинетику предпламенных реакций.

Промотирование воспламенения дизельного топлива на холоднопламенной стадии сводится к введению через спирт в смесь дополнительного количества окисляющихся углеводородов, содержащих гидроксильную группу, а также активных промежуточных центров их окисления. Поэтому и эффект наблюдается при низких температурах, а при повышенных температурах спирты разлагаются в две эндотермические стадии:





Для метанола  $Q_1=1267,05$  кДж/кг,  $Q_2=3846,4$  кДж/кг. При воспламенении метанола-топливной эмульсии в дизеле возможна лишь первая стадия, процесс идет без образования углерода.

Эндотермическое разложение метанола в цилиндре дает дополнительное к происходящему охлаждение заряда за счет испарения энергоносителя, уменьшение интенсивности образования последующих пламен, ухудшение воспламеняемости.

Образовавшийся водород может окисляться по сильно разветвленной реакции, развивающейся по следующей схеме:



Начальной стадией проведенной цепи является термическая диссоциация молекулы водорода на два активных атома  $\dot{H}$  или взаимодействие двух энергетически активированных молекул водорода и кислорода с образованием двух монадрдикалов  $\dot{OH}$  (реакции а), а также образующихся в ходе процесса бирадикалов  $\dot{O}$  (реакции б...г). Реакция (г) повторяется дважды. В итоге этой цепи, инициированной одним атомом  $\dot{H}$ , образуется две молекулы  $H_2O$  и новых активных атомов  $\dot{H}$ .

Так как термическое разложение оксида углерода при температуре среды, имеющей место в дизеле на начальной стадии воспламенения, практически невозможно, то окисление его может осуществляться только по следующей схеме, применимой и для случая окисления углеводородного топлива после окончания развития процесса по формулам:



Приведенные цепные реакции могут идти только при высоких температурах на стадии горячего пламени, чем и объясняется высокотемпературное одностадийное воспламенение как водорода, так и оксида углерода.

Присутствие метанола в эмульсии может увеличить содержание в  $OH^*$  оксида углерода за счет больших возможностей его образования, но в тоже время должно резко снизиться содержание оксидов азота и дымность  $OH^*$ .

Рассмотрим особенности процесса испарения капли метанола-топливной эмульсии в цилиндре дизеля.

Горение дисперсных топливных систем, содержащих в качестве дисперсной фазы полярные жидкости или их смеси (вода, спирты и т.д.), существенно отличается от горения чистых жидких топлив. Отношение диаметра метанольного ядра к диаметру капли определяется объемным содержанием спирта в распыляемой эмульсии.

Испарение является важнейшим подготовительным процессом при горении топлив в дизельных двигателях. Впрыскивание диспергированного жидкого компонента – капли метанола-топливной эмульсии – в газофазный поток с последующим испарением, смешением и горением представлен на рис. 2.1.

Динамическое состояние жидкой фазы эмульсии определяет деформация и вращение капель, возникновение реактивных сил при испарении капли, возникновение циркуляционных течений в самой капле. Анализ каждого из этих процессов позволяет оценить их взаимосвязь и взаимное влияние. Темп испарения определяется температурой газового потока и самих капель, упругостью паров компонентов, относительной скоростью капель, их начальным размером, физическими свойствами газа и жидкости. Обдув испаряющейся поверхности газовым потоком вызывает появление пограничного слоя, толщина которого определяется не только скоростью обдува, но и интенсивностью «обдува» в него продуктов испарения.

Широко распространенной трактовкой пограничного слоя в случае испарения жидкого компонента является «приведенная пленка», в которой сосредоточены градиенты термодинамических и теплофизических параметров.



Рис. 2.1. Схема взаимодействия капли МТЭ и окислителя в цилиндре двигателя

Непрерывно связан с процессом испарения, движения и смешения прогрет конденсированной фазы. Как правило, тепло от внешнего высокотемпературного потока к поверхности передается посредством вынужденной конвекции и теплопроводности. Часть теплового потока преобразуется в теплоту фазового перехода испаряющегося вещества, а оставшаяся часть расходуется на прогрев. Существенно меньшая часть тепла передается к поверхности с диффундирующими индивидуальными веществами. При нагревании возможно термическое разложение жидкого компонента. При этом эмульсия первоначально, не изменяя своего агрегатного состояния, разлагается на вещества, обладающие различными физико-химическими свойствами.

Для определенности процесса испарения капли метанола топливной эмульсии примем при физической схематизации следующие допущения:

- смесь компонентов идеальная;
- температура жидкости одинакова по объему капли;
- для капли, испаряющейся в газовый поток, справедливо допущение сферической симметрии;
- капля движется в высокотемпературном потоке по прямой траектории;
- в процессе испарения и нагрева температура капли после-

довательно достигает равновесных значений, близких к критической температуре каждого компонента;

- пограничный слой моделируется приведенной пленкой;
- приведенная пленка имеет постоянную толщину в любой точке испаряющейся поверхности и не деформируется внешним потоком;
- в пределах рассматриваемых пограничных слоев осуществляется молекулярный перенос вещества, движущей силой которого является диффузия, и конвективный перенос, вызванный стефановским потоком;
- учитываем только явление концентрационной диффузии;
- растворимость газовой фазы в жидкости не учитывается.

Метанола-топливная эмульсия имеет многокомпонентный состав, поэтому механизм ее испарения будет отличаться от испарения чистого дизельного топлива. Физическую схему, положенную в основу модели, можно представить следующим образом (рис. 2.2). В начальный момент времени капля метанола-топливной эмульсии, представляющая идеальную смесь нескольких компонентов (дизельное топливо, метанол, вода и ПАВ), попадает в газовый поток, имеющий более высокую температуру. Наличие относительной скорости приводит к интенсификации внутренней циркуляции в капле, что препятствует расслоению компонентов, имеющих различную плотность. В условиях высоких температур газа следует ожидать, что полное испарение произойдет за малый промежуток времени и перераспределение концентрации компонентов по объему капли будет незначительным. В связи с этим испарение всех компонентов начнется одновременно, концентрация компонентов по объему капли распределена равномерно. В начальный период времени основная часть тепла, подводимая к поверхности капли эмульсии, расходуется на ее нагрев, в связи с чем жидкость испаряется медленно.

Капля эмульсии имеет радиус  $R$ , и температуру  $T_K$ . Содержание компонентов эмульсии характеризуется массовой долей  $\bar{m}_i = m_i(t)/m_{\Sigma}$ . Каждый компонент имеет индивидуальные значения молекулярной массы  $\mu_i$ , плотности  $\rho_i$ , удельной теплоты испарения  $L_{i, \text{исп}}$ , давления насыщенных паров над поверхностью чистой эмульсии  $P_i^*$ .

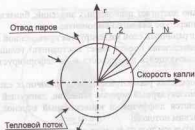


Рис. 2.2. Схема испарения капли метанола-топливной эмульсии в цилиндре дизеля

Исходное уравнение, описывающее скорость испарения  $i$ -го компонента эмульсии, представим в следующем виде:

$$\frac{dm_i}{dt} = -m_i \bar{S}_i, \quad (2.9)$$

где  $m_i$  - массовый расход пара  $i$ -го компонента эмульсии с поверхности капли;

$\bar{S}_i$  - площадь капли эмульсии в нормальных условиях:

$$S_i = \bar{S}_i \cdot 4\pi R_i^2.$$

Площадь поверхности, условно занимаемая  $i$ -м компонентом, принимается пропорциональной объемной доле  $i$ -го компонента в капле эмульсии:

$$S_i = 4\pi R_i^2 \frac{V_i}{V_e} = \frac{3}{R_e} \frac{m_i}{\rho_i}. \quad (2.10)$$

Массовый расход  $i$ -го компонента эмульсии определяется из известного выражения:

$$m_i = -4\pi R_i^2 \frac{D\rho_i}{R_e T_e \gamma} \left( \frac{R_i + \delta}{R_e \cdot \delta} \right) \ln \left( \frac{p - p_i}{p - p_{*i}} \right), \quad (2.11)$$

где  $R_e$  - радиус капли;

$\gamma$  - относительное изменение объема при испарении.

$$\gamma = \frac{V_i - V_{*i}}{V_i} = 1 - \frac{p_i}{p_{*i}},$$

где  $p_i$  - парциальное давление паров над поверхностью капли;  
 $p_{*i}$  - парциальное давление паров за пределом приведенной пленки;

$\delta$  - толщина приведенной пленки:

$$\delta = \frac{2R_e}{N_{*i}}.$$

Для определения теплового  $N_{*i}$  и диффузионного  $N_{*i}$  критериев Нуссельта используем известное соотношение Ранца - Маршала:

$$N_{*i} = 2 + 0,6 \cdot P_i^{1/3} \cdot R_e^{1/2}, \\ N_{*i} = 2 + 0,6 \cdot S_i^{1/3} \cdot R_e^{1/2},$$

где  $P_i$ ,  $R_e$ ,  $S_i$  - критерии Прандтля, Рейнольдса, Шмидта, соответственно вычисляемые при среднем значении температуры парогорючей смеси  $T_{*i}$ .

После несложных преобразований, учитывая, что  $(R_i + \delta)/(R_e \cdot \delta) = N_{*i} + 2$ , получим соотношение для изменения массовой доли  $i$ -го компонента:

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{3(N_{*i} + 2)\bar{m}_i D \rho_i Z_i^2}{2 R_e^2 \rho_i R_e T_e}, \quad (2.12)$$

где  $Z_i^2 = -\ln \left( \frac{p_i - p_i}{p_i - p_{*i}} \right)$ ,  $p_i$  - давление насыщенного пара компонента, находящегося в смеси с другими компонентами.

Величина  $p_i$  определяется по закону Рауля, согласно которому парциальное давление пара над смесью пропорционально мольной доле  $i$ . Коэффициентом пропорциональности является давление насыщенного пара над чистой эмульсией:

$$p_i = p_i^* \gamma_i = \frac{\bar{m}_i \cdot m_{\text{ж}}}{\mu_i \sum_j \bar{m}_j \cdot m_{\text{ж}} / \mu_j \cdot p_j^*} \quad (2.13)$$

Общее давление пара над идеальной смесью является суммой парциальных давлений:

$$p_{\text{ж}} = \sum_j p_j.$$

Уравнение для расчета изменения температуры капли получим из условия баланса тепла:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\sum_j \bar{C}_{p_j} \bar{m}_j \cdot m_{\text{ж}}} \left( \sum_j \frac{d\bar{m}_j \cdot m_{\text{ж}}}{dt} T_{\text{ж}} + Q \right) \quad (2.14)$$

Q определяется по формуле:

$$Q = \frac{m_{\text{ж}} \bar{C}_p (T_{\text{ж}} - T_{\text{ж}}^*)}{\exp \left( \frac{m_{\text{ж}} \bar{C}_p}{4\pi R^2 \lambda_{\text{ж}}} (R_{\text{ж}} + \delta_{\text{ж}}) \right)} - 1 \quad (2.15)$$

с учетом  $m_{\text{ж}} \bar{C}_p = - \sum_j \frac{d\bar{m}_j \cdot m_{\text{ж}}}{dt} \bar{C}_{p_j}$ ,

где  $\bar{C}_p$  - средняя теплоемкость пара;

$\lambda_{\text{ж}}$  - средний коэффициент теплопроводности парогазовой смеси.

Испарение эмульсии в основном протекает при некоторой «равновесной» температуре, когда капля прогрелась и уже в дальнейшем все тепло идет на компенсацию скрытой теплоты парообразования метанола. Это обстоятельство должно привести к увеличению периода задержки воспламенения.

Далее после определенного промежутка времени, когда капля прогрелась полностью и часть ее успела испариться до размера  $R_{\text{ж}}$

$$R_{\text{ж}} = \left( \frac{3}{4\pi} \sum_j \frac{\bar{m}_j \cdot m_{\text{ж}}}{\rho_j} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

наступает эффект «микровзрыва».

Жидкости, как правило, заметно расширяются при нагревании, поэтому возможна работа расширения  $p dV$ . Принимая во внимание наличие системы, состоящей из двух взаимно нерастворимых жидкостей (дизельное топливо - спирт), а также факт большего температурного расширения дизельного топлива по сравнению с метанолом, с полным основанием можно считать процесс нагрева капле эмульсии изохорным, а  $dQ_{\text{ж}} = C_{\text{ж}} \cdot dT_{\text{ж}}$ , вследствие чего он перегревается без испарения. При этом будет интенсивно расти внутреннее температурное давление, величина которого выражается формулой:

$$p_{\text{ж}} = T \left( \frac{\partial p_{\text{ж}}}{\partial T_{\text{ж}}} \right) - p_{\text{ж}} \quad (2.17)$$

где  $p_{\text{ж}}$  - давление среды в камере сгорания дизеля.

Из формулы (2.17) следует, что при изменении температуры среды на 10 К внутреннее давление ядра капли возрастает в 200...250 раз. Именно внутреннее температурное давление является фактором, вызывающим «микровзрыв» капли метанола-топливной эмульсии.

В одной капле эмульсии содержится от одной до нескольких капелек спирта, что дает право анализировать простейшую модель: в сферической капле энергоносителя расположена концентрично сферическая капля спирта. Сферичность объемов обусловлена наличием на поверхности раздела фаз с различной плотностью поверхностного натяжения  $\sigma$  - силы, действующей на единицу длины ее периметра, стремящейся свести к минимуму величину поверхности. Поверхностное натяжение является физической константой вещества, основной характеристикой поверхностного слоя. Его величина определяется свойствами компонентов и температурой. Для спирта и дизельного топлива величина  $\sigma$  зависит от температуры линейно, что выражается формулами:

$$\sigma = \sigma_0 - aT,$$

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{r^*}{T} = -a,$$

где  $r^*$  - теплота образования поверхности.

Вследствие увеличения кинетической энергии молекулы легче проникают в поверхностный слой, уменьшая поверхностную энергию и тенденцию к сокращению размеров пленки. У метанолю-топливной эмульсии  $\sigma$  зависит от температуры в большей степени, увеличиваясь по мере введения метанола. Если дизельное топливо является дисперсией средой эмульсии, то величина  $\sigma$ , удовлетворительно описывается уравнением:

$$\sigma = \sigma_0 [1 + (2,4 + 0,03T) k_0],$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma$  - поверхностные натяжения на границах систем эмульсия - воздух и дизельное топливо - воздух;  
 $k_0$  - удельное содержание метанола в эмульсии.

В соответствии с уравнением Лапласа равнодействующая всех сил поверхностного натяжения направлена к вогнутой стороне и равна:

$$p^* = \sigma \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right), \quad (2.18)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - радиусы кривизны в двух взаимно перпендикулярных сечениях.

Принято считать кривизну положительной, если более плотная фаза лежит с вогнутой стороны, и отрицательной - если с выпуклой стороны. Для капель эмульсии  $\rho_1 = \rho_2$  и  $p^* = 4\sigma/d$ . Тогда, принимая во внимание равновесие сил, условие разрыва капля запишется в следующем виде:

$$p_0 = T \left( \frac{\partial p_0}{\partial T} \right) - p_0 > 4 \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{d_1 + d_2} \right), \quad (2.19)$$

из которого следует, что «микровзрыв» наступит тем раньше, чем меньше поверхностное натяжение и больше диаметры сфер входящих в нее компонентов. При этом определяющим фактором

является содержание метанола, хотя его поверхностное натяжение в 1,3 раза меньше, чем у дизельного топлива, однако диаметр капель эмульсии больше эквивалентного диаметра метанольных включений в 8...10 раз.

Дробление капель эмульсии в цилиндре дизеля не только увеличивает поверхность горения, но и улучшает смесеобразование топлива с воздухом. Это, в свою очередь, сокращает время горения, позволяет снизить коэффициент избытка воздуха, не снижая полноты сгорания топлива.

Количество образующихся капель после эффекта «микровзрыва» метанолю-топливной эмульсии подчиняется вероятностному закону распределения, чаще всего распределению Розина - Рамлера:

$$\frac{V_x}{V_0} = 1 - \exp[-(d_x/d_0)^n], \quad (2.20)$$

где  $V_x$  - суммарный объем капель, диаметры которых находятся в диапазоне от  $d_{\min}$  до  $d$ ;

$V_0$  - объем капли до дробления;

$d_x$  - текущее значение диаметра капли;

$d_0$  - постоянная величина, называемая характеристикой размера;

$n$  - постоянная, называемая характеристикой распределения.

Здесь и далее новые вторичные капли, образованные эффектом «микровзрыва», продолжают дальнейшее испарение. При моделировании диффузионного процесса рассмотрим концентрационную диффузию, которая приводит к возникновению диффузионных потоков отдельных веществ, инициируя тем самым физико-механическое изменение состава и, следовательно, протекающие химические реакции в пограничном слое, изменение температуры и состава продуктов реакции.

Газовая смесь в цилиндре дизеля на данном этапе испарения находится при высоких температурах и больших давлениях, поэтому скорости химических реакций протекают быстро, а для определения состава продуктов реагирования используется метод расчета химического равновесия. Однако особенность рассмат-

риваемых приповерхностных слоев состоит в том, что температура смеси в них может меняться практически от температуры поверхности до температур внешнего потока. Известно, что в области низких температур время химического взаимодействия становится соизмеримым со временем протекания диффузии. Тогда при определении состава эмульсии в пограничном слое учитываем конечность скоростей химических реакций, то есть используем приемы и методы химической кинетики.

Из вышесказанного следует, что комплекс сложных химических преобразований при испарении локализован внутри пограничного слоя и связан с тепло- и массообменными процессами как внутри конденсированной фазы и на ее поверхности, так и в самом пограничном слое.

Моделирование параметров этих процессов представляет несомненный интерес с точки зрения получения новых сведений о совместном протекании тепло- и массообменных процессов с химическими превращениями и диффузией в тонких слоях расплавленной «микровзрывом» метанола-топливной эмульсии.

Модель приведенной пленки [64, 69, 112...114, 116] позволяет определить темп испарения жидкости со сферической поверхности с учетом стефановского потока. Модель не учитывает химическое реагирование в пленке продуктов фазового перехода и внешнего потока, поэтому комплекс химических реакций заменяется одной брутто-реакцией, пограничный слой для упрощения разбивается на зону окислителя и зону горючего.

Реагирующий слой разделяем на зоны окислителя и горючего и оперируем интегральными зависимостями для расчета концентраций продуктов химического реагирования, исходя из стехиометрии брутто-реакций.

Сформулируем физическую схему процессов в реагирующих слоях, отражающую основные физико-химические процессы при испарении компонентов раздробленной эмульсии с поверхности капли, а также при химических преобразованиях газофазных продуктов в зоне горения гетерогенной смеси.

В соответствии с описанием физико-химических процессов в качестве пограничного слоя, окружающей новую каплю эмульсии, рассмотрим пограничный слой, состоящий из набора взаимосвязанных уровней, обменивающихся массой и энергией

посредством молекулярной диффузии, конвекции и теплопроводности (рис. 2.3). Контактный слой с поверхностью раздела фаз уровень обменивается с каплей массой (испарение жидкой фазы с поверхности капли) и некоторым количеством теплоты  $q$ . Уровень, контактирующий с окружающей средой, обменивается массой и энергией с набегающим потоком.



Рис. 2.3. Физическая схема процесса в реагирующих слоях при испарении новой капли эмульсии

В соответствии с данной физической схемой запишем уравнение сохранения для случая испарения компонента эмульсии с поверхности. При этом газовую смесь в каждом уровне будем рассматривать в идеальном приближении. Уравнение сохранения массы для уровня «j» запишем в следующей форме:

$$\frac{dM_j}{dt} = F_{j-1,j} J_{j-1,j} - F_{j,j} J_{j,j} + \sum_{z=1}^n F_{j,z} J_{j,z} - \sum_{z=1}^n F_{z,j} J_{z,j} + \sum_{z=1}^n F_{z,j+1} J_{z,j+1} - \sum_{z=1}^n F_{j+1,z} J_{j+1,z} \quad (2.21)$$

где  $J$  - удельный конвективный обмен массой между уровнями;

$F_{j,z}$  - удельный диффузионный обмен массой между уровнями;

$F_{j+1,z}$  - площадь поверхности контакта между соседними уровнями;

$j = 1, \dots, n$ ;

$z = 1, \dots, n$ .

Уравнение сохранения энергии для  $j$ -го уровня:

$$\begin{aligned} dQ_{j+1} - dQ_j + d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j} - d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j+1} + d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j} - \\ - d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j+1} + dQ_{m,i,j} - dQ_{m,i,j+1} = dU_j + p dV_j, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где  $dQ_{j+1}$  - энергия, подводимая в уровень  $j$  из уровня  $j - 1$  конвективным потоком;

$dQ_j$  - энергия, отводимая из уровня  $j$  в уровень  $j + 1$  конвективным потоком вещества;

$d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j}$ ,  $d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j+1}$  - энергия, подводимая в уровень  $j$  из уровней  $j + 1$  и  $j - 1$  с диффундирующими веществами;

$d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j+1}$ ,  $d \sum_{i=1}^n Q'_{e,i,j}$  - энергия, отводимая из уровня  $j$  в уровни  $j + 1$  и  $j - 1$  с диффундирующими веществами;

$dQ_{m,i,j}$  - количество тепла, подводимое в уровень  $j$  от уровня  $j + 1$  теплопроводностью;

$dQ_{m,i,j+1}$  - количество тепла, отводимое из уровня  $j$  в уровень  $j - 1$  теплопроводностью;

$dU$  - изменение внутренней энергии смеси в уровне;

$p dV_j$  - работа расширения;

$V_j$  - объем уровня  $j$ .

Учитывая, что  $U = J \cdot PV$ , и выполнив некоторые преобразования, запишем формулу (2.22) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dt} - p \frac{dV_j}{dt} - V_j \frac{dp}{dt} + p \frac{dV_j}{dt} = m_{j+1} i_{j+1} - m_j i_j + \sum_{i=1}^n m_{e,i,j} i'_{e,i} - \\ - \sum_{i=1}^n m_{e,i,j+1} i'_{e,i} + \sum_{i=1}^n m_{e,i,j} i'_{e,i} - \sum_{i=1}^n m_{e,i,j+1} i'_{e,i} + q_{m,i,j} - q_{m,i,j+1}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

где  $m = JF$ .

В связи с тем, что испарение новой капли происходит в стационарном режиме, толщину пограничного слоя и, соответствен-

но, объем каждого уровня будем считать неизменным.

В этом случае уравнение (2.23) с использованием уравнения (2.21) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dt} = \frac{R_0 T_j}{\mu_j P V_j} [J_{j+1} F_{j+1} (i_{j+1} - i_j) + \sum_{i=1}^n J_{e,i,j} F_{e,i} (i'_{e,i} - i_j) - \\ - \sum_{i=1}^n J_{e,i,j+1} F_{e,i} (i_{j+1} - i_j) + \sum_{i=1}^n J_{e,i,j+1} F_{e,i} (i'_{e,i} - i_j) - \\ - \sum_{i=1}^n J_{e,i,j} F_{e,i} (i'_{e,i} - i_j) + q_{m,i,j} F_{m,i} - q_{m,i,j+1} F_{m,i}], \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $i_j$  - массовая энтропия в уровне  $j$ ;

$T_j$  - температура в уровне  $j$ ;

$\mu_j$  - молекулярная масса продуктов в уровне  $j$ ;

$J_{j+1}$  - удельный массовый конвективный поток в уровень  $j$  из уровня  $j - 1$ ;

$J_{e,i,j+1}$ ,  $J_{e,i,j}$ ,  $J_{e,i,j+1}$ ,  $J_{e,i,j}$  - удельные массовые диффузионные потоки между уровнями  $j + 1$ ,  $j$  и  $j$ ,  $j - 1$ , соответственно;

$q_{m,i,j+1}$ ,  $q_{m,i,j}$  - удельные тепловые потоки в уровень  $j$  из уровня  $j$ , соответственно;

$F_{e,i,j+1}$ ,  $F_{e,i,j}$  - площади поверхностей контакта между уровнями  $j - 1$ ,  $j$  и  $j + 1$ ,  $j$ .

Естественно, что для уровня  $j = z$  в уравнении (2.24) необходима замена вида:  $i_{j+1} = i'_z$ ;  $J_{e,i,j+1} = J'_{e,i}$ ;  $J_{e,i,j} = J'_{e,i}$ ;  $T_j = T_z$ .

Для уровня, контактирующего с поверхностью испарения, уравнение (2.24) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dt} = \frac{R_0 T_j}{\mu_j P V_j} [J_1 F_1 (i_1 - i_j) + \sum_{i=1}^n J_{e,i,j} F_{e,i} (i'_{e,i} - i_j) - \\ - \sum_{i=1}^n J_{e,i,j} F_{e,i} (i_j - i_j) + q_{m,i,j} F_{m,i}], \end{aligned} \quad (2.25)$$

Система уравнений (2.24), (2.25) вместе с базовой системой изменения состава

$$\frac{dT_p}{dt} = -e^{\lambda} \sum_p V_p k_p \left( \frac{P}{R T_p} \right)^{n_p} \exp \left( - \sum_p n_p \gamma_p \right) + \sum_q \sum_p V_p k_p \left( \frac{P}{R T_p} \right)^{n_p} \exp \left( - \sum_p n_p \gamma_p \right) \quad (2.26)$$

где  $i, p, q = 1, \dots, n$ ;  
 $j = 1, \dots, (2m+n)$ ;  
 $s = 1, \dots, z$ ;  $z$  - число уровней в системе,  
 и уравнениями температуры

$$\frac{T_i - T_{\infty} - \sum_i (i, \mu_i - I_{\infty} k_i)}{\sum_i e_i^{\infty} \tau_i} = 0, \quad (2.27)$$

где  $s = 1, \dots, z$ ;  $z$  - число уровней в системе, записанное для каждого уровня, составляет математическую модель процессов преобразования продуктов испарения в пограничном слое, окружающем новую каплю эмульсии.

Уравнение (2.26) позволяет полностью формализовать все процессы обмена массой между уровнями с помощью констант скоростей реакций (2.7), рассматриваемых в физической схеме процесса.

Одним из важнейших вопросов конкретизации правых частей уравнений (2.24), (2.25) является определение темпа испарения жидкого компонента  $J_s$  с поверхности капли.

Поскольку рассматриваем процесс испарения капли в высокотемпературном газовом потоке, температура которого ( $T_p$ ) существенно превышает температуру кипения ( $T_{кип}$ ) компонента топлива, для моделирования испарения используем концепцию равновесного испарения. При этом поток испаряющихся веществ определяется из соотношения:

$$J_s = \frac{\lambda N_s}{C_p d_s} \ln \left[ 1 + \frac{C_p}{L_{кип}} (T_p - T_{кип}) \right], \quad (2.28)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газовой смеси;

$C_p$  - теплоемкость паров компонента;

$L_{кип}$  - скрытая теплота парообразования;

$T_{кип}$  - равновесная температура капли;

$d_s$  - диаметр капли.

Так как капля прогрета равномерно до температуры  $T_{кип}$ , то установившийся режим испарения подчиняется условию  $T_{кип} \approx T_{\infty}$  (которое является следствием того, что  $T_p \gg T_{кип}$ ).

В соответствии с уравнением неразрывности соотношение для определения конвективного переноса массы из уровня  $j-1$  в уровень  $j$  запишется:

$$J_{j+1} = \frac{1}{F_{j+1}} [J_{j+1} F_{j+1} + F_{j+2} \sum_{s=2}^j J_{s-2,j-1} - F_{j-2,j+1} \sum_{s=2}^j J_{s+1,j} + F_{j+1} \sum_{s=2}^j J_{s+1,j} - F_{j+1} \sum_{s=2}^j J_{s-2,j}], \quad (2.29)$$

Для определения диффузионных потоков целесообразно принять распространенное допущение о том, что основные закономерности массообмена не нарушаются, когда исследуемые процессы осложнены химическими реакциями. Исходя из предположения бинарной диффузии закон Фика для  $i$ -го вещества запишется:

$$j = -D \frac{dC_i}{dx}, \quad (2.30)$$

Интегрирование его по толщине уровня приводит к выражению для диффузионного потока  $i$ -го индивидуального вещества между уровнями  $j-1$  и  $j$ :

$$J_{j+1} = \frac{PD_{i,j}^2 (\rho_{i,j}^* - \rho_{i,j}^*)}{R_s T_{j+1} \Delta x}, \quad (2.31)$$

Используя аналогичным образом закон Фурье, получим выражение для расчета тепловых потоков из уровня  $j+1$  в уровень  $j$ :



$$q_{\text{исп}} = \frac{\lambda_{\text{исп}}}{\Delta x} (T_{\text{пл}} - T_{\text{ж}}) \quad (2.32)$$

Анализ массообменных процессов показывает, что для любого из уровней имеет место конвективная связь с предыдущим уровнем. Эта связь отражает конвективный поток паров и продуктов их реагирования от поверхности к наступающему потоку, а также стефановский поток.

Данная модель показывает, каким образом происходит испарение метанола-топливной эмульсии с присадками целенаправленного действия. Процесс испарения капли метанола-топливной эмульсии в первый период времени увеличивается по сравнению с испарением чистого дизельного топлива. Это происходит из-за увеличения, по сравнению с дизельным топливом, скрытой теплоты парообразования метанола, которая снижает температуру в цилиндре дизеля. Но после наступления эффекта «микровзрыва» весь процесс испарения протекает значительно быстрее и ведет к ускоренному процессу горения метанола-топливной эмульсии, что должно увеличить жесткость и максимальное давление процесса сгорания.

## 2.2 Влияние состава метанола-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля

Воспламенение топлива от сжатия в цилиндре дизеля носит сложный и многостадийный характер. К настоящему времени разработана достаточно адекватная схема процесса испарения и горения капли метанола-топливной эмульсии. Принято считать, что низкотемпературное воспламенение перемешанных с воздухом углеводородов носит пепочно-тепловой характер. Скорость протекания подготовительных процессов обуславливается скоростью нагревания и испарения вырванной дозы топлива, а также склонностью топлива к образованию активных частиц. При конвертации дизеля для работы на смешанном топливе метанол и ДТ вводятся одновременно в цилиндр одновременно. Пары метанола поджигаются пламенем ДТ, воспламенение которого происходит многостадийно по традиционной схеме. При этом испарение частиц

метанола и их подготовка к окислению вызывает понижение температуры заряда. Энергия для разложения молекулы метанола на активные радикалы отбирается от части ДТ, поступившей за период задержки воспламенения. Добавление метанола не оказывает существенного влияния на период задержки воспламенения и приводит лишь к незначительному изменению его величины. Вместе с тем, если допустить, что испарившийся спирт равномерно распределен по всему воздушному заряду, то остается открытым вопрос о количестве спирта, сгорающего в первой фазе сгорания и определяющем величину динамических показателей [101, 118].

При расчете периода задержки воспламенения обычно допускают, что в первой фазе сгорает количество спирта  $m_{\text{в,сж}}$  содержащегося в количестве воздуха  $l_0 \cdot m_{\text{в,сж}}$  образующем стехиометрическую смесь с количеством топлива  $m_{\text{ж}}$ , испаряющимся за период задержки воспламенения. Допущение обосновано исходя из сопоставления расчетных и опытных значений  $P_2$ .

Рассмотрев особенности изменения параметров фазы быстрого сгорания, можно попытаться провести дальнейший расчет следующих величин:

- максимального давления цикла  $P_2$ ;
- максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ ;
- угла  $\varphi_2$  соответствующего  $P_2$ ;
- средней скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\text{ср}}$ .

$P_2$  можно определить в зависимости от количества испарившегося за период задержки воспламенения топлива. Для предварительного расчета можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$P_2 = P_C + 5,39 \cdot 10^{-4} \cdot m_{\text{ж}} \cdot H_0 \cdot (n_1 - 1) / V_C, \quad (2.33)$$

где  $P_C$  – давление в конце сжатия, МПа;

$m_{\text{ж}}$  – количество топлива, испаряющегося за период задержки воспламенения, г;

$H_0$  – теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$n_1$  – показатель политропы;

$V_C$  – объем камеры сжатия, м<sup>3</sup>.

Учитывая, что точное определение  $m_{v,j}$  достаточно проблематично, согласно [101], в расчетах принимаем  $m_{v,j} = (45 \dots 55\%) q_{H_2}$ .

Рассмотрим случай, когда сгорает весь метанол, поданный в цилиндр двигателя с метаноло-топливной эмульсией:

$$P_e = P_c + 5,39 \cdot 10^{-4} \cdot (m_{v,j} \cdot H_u + q_{v,em} - H_{v,em}) \cdot (n_1 - 1) / V_c, \quad (2.34)$$

где  $q_{H_2}$  – суммарная цикловая подача топлива, г/цикл;

$q_{H_2,em}$  – цикловая подача метанола, г/цикл;

$H_u$  – теплота сгорания метанола.

Численный коэффициент в уравнениях (2.33, 2.34) учитывает потери теплоты в стенку цилиндра за счет теплоотдачи, изменения числа молей рабочего тела и зависимость теплоемкости от температуры.

В расчетах принимаем  $n_1 = k$ .

Цикловую подачу суммарного топлива можно определить по известной формуле:

$$q_u = 16,6 \cdot \frac{G_T \cdot \tau}{i_c \cdot n}, \quad (2.35)$$

где  $G_T$  – часовой расход топлива, кг/ч;

$n$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$i_c$  – число цилиндров двигателя;

$\tau$  – тактность двигателя.

В то же время полагаем, что количество сгоревшего метанола равно:

$$m_{v,com} = (m_{v,j} / q_{H_2}) \cdot (q_{v,em} / \alpha), \quad (2.36)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в смеси.

Для расчета параметров фазы быстрого горения – максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ , угла  $\phi_z$ , средней скорости нарастания давления  $(\Delta p / d\phi)_{\text{cp}}$  – можно воспользоваться известными зависимостями с учетом характерных особенностей суммарного топлива:

$$\left( \frac{dp}{d\phi} \right)_{\text{max}} = \frac{6 \cdot n \cdot 10^{-9} \cdot P_c \cdot P'}{\sqrt{K_{T,2} \cdot d_{p,2}^2}} \cdot \frac{P_c \cdot P'}{\phi} \cdot \left( \frac{m_{v,j} \cdot (1 + q_{v,em} / (q_u \cdot \alpha))}{q_u \cdot (1 + q_{v,em} / q_u)} \cdot \frac{100}{\text{ЦЧ}_2} \right), \quad (2.37)$$

где  $n$  – частота вращения двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$K_{T,2}$  – фактор, характеризующий свойства топлива;

$d_{p,2}^2$  – коэффициент, характеризующий отношение плотности спирта к суммарной плотности топлива;

$P'$  – теоретическое давление конца сжатия, МПа;

$\phi_1$  – период задержки воспламенения в градусах п.к.в.;

$\tau$  – время, с;

$\text{ЦЧ}_2$  – суммарное цетановое число топлива.

Фактор, характеризующий свойства топлива, в уравнении (2.37) можно найти из выражения, предложенного в работе [123]:

$$K_T = \frac{1,216 \cdot \sqrt{T_m}}{P_T}, \quad (2.38)$$

где  $T_{50}$  – среднеобъемная температура разгонки топлива;

$P_T$  – суммарная плотность топлива,  $\text{г/см}^3$ .

Принимая во внимание то обстоятельство, что стандартная зависимость ЦЧ от  $\phi_1$  для смеси цетана с  $\alpha$ -метилнафталином носит гиперболический характер, при проецировании действительное ЦЧ смеси ДТ с метиловым спиртом будет меньше значения, найденного из условия аддитивности, т.е.

$$\text{ЦЧ}_2 = \text{ЦЧ}_{\text{см}} - \Delta \text{ЦЧ}. \quad (2.39)$$

Учитывая присутствие в смеси эмульгаторов,  $\text{ЦЧ}_{\text{см}}$  можно рассчитать по формуле:

$$\text{ЦЧ}_{\text{см}} = \text{ЦЧ}_1 \times M_1 + \text{ЦЧ}_2 \times M_2 + \text{ЦЧ}_{3\text{ЭМ1}} \times M_{3\text{ЭМ1}} + \text{ЦЧ}_{3\text{ЭМ2}} \times M_{3\text{ЭМ2}}, \quad (2.40)$$

где  $\text{ЦЧ}_1, \text{ЦЧ}_2, \text{ЦЧ}_{3\text{ЭМ1}}, \text{ЦЧ}_{3\text{ЭМ2}}$  – соответственно, ЦЧ метанола, ДТ и каждого эмульгатора;

$M_1, M_2, M_{3\text{ЭМ1}}, M_{3\text{ЭМ2}}$  – соответственно, доля метанола, ДТ и каждого эмульгатора.

$$\Delta \text{ЦЧ} = [\ln(100 \cdot M_1) - 1] \cdot \ln \text{ЦЧ}_1, \quad (2.41)$$

$$\text{где } \delta \alpha'_2 = \delta \alpha_2 \cdot \frac{i_1}{i_2 + i_{n1} + i_{n2}} + \frac{i_{n1} + i_{n2}}{i_2 + i_{n1} + i_{n2}}. \quad (2.42)$$

Угол  $\varphi_2$  можно определить из уравнения:

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \Theta_{\text{оп}}^* + \left(\frac{100}{100}\right) \cdot d_{\text{эл}} \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{оп}}}{i_{1,12}}\right), \quad (2.43)$$

где  $\Theta_{\text{оп}}^*$  - расчетный угол опережения впрыскивания топлива, град. п.к.в.;

$\varphi_{\text{оп}}$  - продолжительность впрыскивания топлива, град. п.к.в.;

$i_{1,12} = \frac{m_{1,12}}{q_s}$  - относительная степень испарения топлива за период задержки воспламенения.

При этом относительную степень испарения топлива за период задержки воспламенения можно определить следующим образом:

$$i_{1,12} = \frac{m_{1,12} + (m_{1,12} \cdot q_{\text{исп}}) / (q_s \cdot \alpha)}{q_s + q_{\text{исп}}}. \quad (2.44)$$

Тогда среднюю скорость нарастания давления  $(\Delta p / d\varphi)_{\text{ср}}$  можно подсчитать по формуле:

$$\left(\frac{\Delta p}{d\varphi}\right)_{\text{ср}} = (P_2 - P_c) \cdot (\varphi_2 + \Theta_{\text{оп}}^* - \varphi_1). \quad (2.45)$$

При проведении расчетов придерживаемся следующих правил:

- при расчете параметра  $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$  используем расчетные значения  $P_{2c}$ ,  $\varphi_{2c}$  и опытные значения  $\varphi_1$ ;
- для расчета остальных параметров также используем опытные значения  $\varphi_1$ ;
- значения неуказанных параметров принимаем такими же, что и в выражении (2.37).

По уравнениям (2.31) - (2.45) нами были проведены расчеты параметров первой фазы сгорания в дизеле. Результаты расчета, а

также все промежуточные значения параметров сведены в таблицу 2.1.

Данные расчетов показывают, что присутствие метанола топливной эмульсии влияет и на параметры фазы быстрого горения.

Максимальное значение давления  $P_2$  возрастает пропорционально росту присутствия метанола в топливе.

Максимальная скорость нарастания давления в цилиндре дизеля увеличивается с 0,397 до 0,573 МПа/градус, что соответствует повышению жесткости работы дизеля.

Угол  $\varphi_2$  также растет, что может означать влияние на процессы самовоспламенения и горения присутствия в топливе добавок.

Средняя скорость нарастания давления в цилиндре достигает предельно допустимого (по соображениям долговечности дизеля) значения при добавке 35 % метанола.

Параметр	0%		10%		20%		30%		35%	
	Р <sub>2</sub>	φ <sub>2</sub>	Р <sub>2</sub>	φ <sub>2</sub>	Р <sub>2</sub>	φ <sub>2</sub>	Р <sub>2</sub>	φ <sub>2</sub>	Р <sub>2</sub>	φ <sub>2</sub>
Р <sub>2</sub> , МПа	10,0	10,0	10,5	10,5	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	12,0
φ <sub>2</sub> , град.	10,0	10,0	10,5	10,5	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	12,0
(dp/dφ) <sub>ср</sub> , МПа/град	0,397	0,397	0,450	0,450	0,500	0,500	0,550	0,550	0,573	0,573
φ <sub>1</sub> , град.	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
φ <sub>2</sub> , град.	10,0	10,0	10,5	10,5	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	12,0
φ <sub>оп</sub> , град.	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Θ <sub>оп</sub> <sup>*</sup> , град.	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
φ <sub>2</sub> + Θ <sub>оп</sub> <sup>*</sup> , град.	10,0	10,0	10,5	10,5	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	12,0
φ <sub>2</sub> - φ <sub>1</sub> , град.	0,0	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0
φ <sub>2</sub> + Θ <sub>оп</sub> <sup>*</sup> - φ <sub>1</sub> , град.	0,0	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0

Таблица 2.1

Данные расчета параметров фазы быстрого старения при работе на метаноле-топливной эмульсии

	65%ДТ +35%АМ		80%ДТ +20%АМ		ДТ		Состав топлива п, мин <sup>-1</sup> ρ <sub>ж</sub> , г/см <sup>3</sup> P <sub>ж</sub> , МПа H <sub>ж</sub> , МДж/кг G <sub>ж</sub> , кг/ч α φ <sub>ж</sub> , г/шкв φ <sub>ж-ст</sub> , г/шкв v <sub>л</sub> m <sub>ж,г</sub> m <sub>ж,ст,г</sub> φ <sub>ж</sub> , г/шкв
	1800	1400	1800	1400	1800	1400	
	0,812	0,812	0,815	0,815	0,82	0,82	
	4,31	4,32	4,29	4,30	4,27	4,28	
	34,45	34,45	37,90	37,90	42,50	42,50	
	5,70	4,37	5,10	3,91	4,55	3,50	
	1,76	1,83	1,77	1,85	1,79	1,86	
	0,0520	0,0518	0,0470	0,0460	0,0420	0,0415	
	0,0182	0,0181	0,0094	0,0092	-	-	
	1,376	1,377	1,374	1,375	1,373	1,374	
	0,0316	0,0328	0,0294	0,0316	0,0269	0,0287	
	0,0062	0,0062	0,0033	0,0034	-	-	
	8	6	0	0	-	-	
	0,973	0,973	0,969	0,969	1	1	

Продолжение таблицы 2.1

	8,7550	8,7550	8,8519	8,8519	8,8519	9,0620	9,0620	9,0620	9,0620	К <sub>ж-ст</sub> φ <sub>ж</sub> , град п.к.р.
	32,0	31,0	27,2	25,6	24,2	22,7	22,7	24,2	22,7	
	23,7	25,05	23,5	24,7	23,0	24,1	24,1	23,0	24,1	
	25,74	25,74	31,24	31,24	31,24	45,00	45,00	45,00	45,00	
	0,540	0,559	0,582	0,610	-	-	-	-	-	
	7,866	8,110	7,725	7,973	7,571	7,840	7,840	7,571	7,840	
	0,573	0,605	0,517	0,559	0,397	0,478	0,478	0,397	0,478	
	13,0	12,2	9,42	7,85	-	-	-	-	-	
	0,374	0,421	0,432	0,461	-	-	-	-	-	

### 3 УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ 24 10,5/12,0 ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

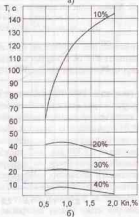
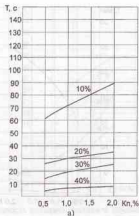
#### 3.1 Результаты исследований свойств метано-топливных эмульсий с присадками целенаправленного действия

Применение присадок поверхностно-активных веществ, вводимых в ДТ, должно в первую очередь обеспечивать стабильность получаемых метано-топливных эмульсий, достаточную для работы дизеля в течение 7-часовой смены. В случае работы дизеля на МТЭ, приготовленной в его топливной системе, значение стабильности должно быть несколько больше времени, необходимого для подачи готовой МТЭ в цилиндры [132]. Это объясняется наличием застойных зон в системе топливоподготовки, в которых постоянно накапливается гель высококонцентрированной эмульсии типа «масло – в – воде» [132]. Концентрация ПАВ при этом не должна превышать 2...3 %, так как это может привести к значительному удорожанию способа подачи метано-топливной эмульсии.

На рисунке 3.1,а представлены изотермы стабильности МТЭ с применением присадки КС-17. Из графика видно, что стабильность прямо пропорциональна количеству вводимого эмульгатора и обратно пропорциональна содержанию метанола в топливе. Однако значения стабильности невысоки. Так, при увеличении концентрации метанола до 30 % время до начала седиментации не превышает 25 секунд, а при дальнейшем увеличении содержания метанола это время уменьшается до 5 секунд.

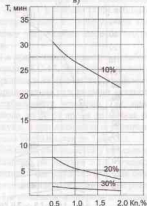
Такая же стабильность наблюдается у присадки МР, изотермы которой представлены на рисунке 3.1,б. Очевидно, что возможность использования этих эмульгаторов для повышения стабильности метано-топливной эмульсии маловероятно.

На рисунке 3.1,в показаны изотермы стабильности МТЭ с применением присадки КС-18. Как видно, эффективность этого ПАВ немного выше.

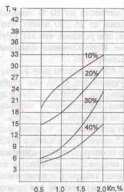




а)



б)



в)

Рис. 3.1. Стабильность метано-топливной эмульсии от содержания метанола и присадки: Кп – содержание присадки; 10, 20, 30, 40 % – содержание метанола в МТЭ; а) присадка КС-17; б) присадка МР; в) присадка КС-18; г) присадка МЧ Л/98; д) присадка С-5А

Так, 1 % присадки достаточно для обеспечения стабильности МТЭ с содержанием метанола 30 % в течение 1 минуты, причем с уменьшением количества метанола это время возрастает в несколько раз.

Влияние в ДТ присадки МЧ-Л/98 (амикром) на стабильность МТЭ (рис. 3.1,г) имеет совершенно иную форму. Как видно из графика, увеличение концентрации эмульгатора с 0,5 до 2,0 % снижает стабильность топлива, содержащего 10 % метанола, с 30 до 22 минут. С увеличением содержания метанола эта тенденция значительно ослабевает. Так, для МТЭ с содержанием 30 % метанола влияние присадки на изменение стабильности выражено слабо во всем исследуемом диапазоне изменения концентрации эмульгатора. Стабильность приготовляемых метано-топливных эмульсий остается почти постоянной и не превышает 2 минут.

Применение амикрома может быть оправдано для низкоконцентрированных метано-топливных эмульсий. Снижение в

них присутствия метанола до 10 % повышает стабильность до начала седиментации до 25...30 минут, что вполне достаточно для работы дизеля, при условии, что МТЭ будет готовиться в его топливной системе. Использование амикрома в пределах, больше 0,5 %, нецелесообразно.

На рисунке 3.1,д приведены результаты исследований влияния присадки сукцинимид С-5А на стабильность метанола-топливной эмульсии. Как видно из графика, сукцинимид является высокоэффективным эмульгатором обратный типа, обеспечивающим их высокую стабильность. Так, 0,5 % сукцинимид обеспечивает стабильность топлива, содержащего 40 % метанола, в течение 5 часов. Стабильность МТЭ, приготавливаемых в этом опыте, прямо пропорциональна содержанию ПАВ и обратно пропорциональна содержанию метанола в топливе. Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения сукцинимид в качестве эмульгатора для приготовления метанола-топливной эмульсии вне топливной системы дизеля [141, 151, 144].

В целях снижения износов трущихся поверхностей, контактирующих со спиртом, было исследовано несколько различных составов метанола-топливных эмульсий. Учитывая, что попытки использовать производимые в мире антикоррозионные присадки не дали положительного эффекта, а также то обстоятельство, что присутствие различных соединений может в значительной степени ослабить действие друг друга, в качестве одного из основных принималось условие синергетического взаимодействия присадок. Достаточно сложным является одновременное повышение воспламеняемости метанола-топливной эмульсии без ухудшения других эксплуатационных свойств. Дело в том, что промоторы воспламенения – алкилнитраты или органические пероксиды, – как правило, токсичны, плохо влияют на уплотнительные материалы, отрицательно влияют на температурные характеристики ДТ, состав отработавших газов [74].

Использование эмульгаторов, близких по своей структуре к присадкам полифункционального действия – ПАВ на основе ненасыщенных алифатических жирных кислот  $C_{16}$  -  $C_{18}$  и низших полифункциональных аминов, позволило создать метанола-топливную эмульсию с подобными свойствами [146].

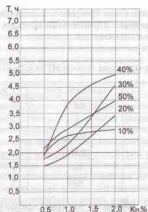


Рис. 3.2. Влияние композиции присадок С-5А и КС-18 на стабильность метанола-топливной эмульсии:  $K_p$  – содержание присадки; 10, 20, 30, 40 % – содержание метанола в МТЭ

Проведены исследования физико-химических свойств и стабильности смесей ДТ и метанола различного состава с применением присадок подобного типа («Амикром МЧ - Л/98» и КС –18), разработанных в лабораториях 25 ГосНИИ МО РФ для комплексного улучшения показателей: снижения износов, улучшения смазывающих свойств и повышения цетанового числа низкоцетановых топлив (рис.3.2). В опытах использовалась метанола-топливная эмульсия, состоящая из 0,2 % присадки КС - 18 и переменного количества сукцинимидной присадки С - 5А.

В таблице 3.1 приведены данные плотности и кинематической вязкости различных составов МТЭ с использованием названных композиций присадок.

Применяя стабильные метанола-топливные эмульсии, приготавливаемые заблаговременно, в качестве топлива для дизелей, необходимо знать их склонность к изменению однородности состава и время до полного разделения дисперсной системы на две фа-

за. С этой целью были проведены исследования стабильности МТЭ, приготавливаемых с применением присадок С-5А и КС-18 к седиментации и коалесценции.

Таблица 3.1  
Физико-химические свойства МТЭ с 0,2% КС-18 и 1% С-5А

Состав	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Вязкость, мм <sup>2</sup> /с
10 % М	0,817	3,25
20 % М	0,815	2,95
30 % М	0,813	2,65
35 % М	0,812	2,51
40 % М	0,81	2,35
ДТ 100 %	0,82	3,55

На рис. 3.3 приведены изотермы стабильности метано-топливной эмульсии к седиментации.

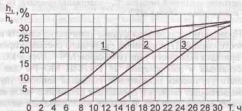


Рис. 3.3. Стабильность метано-топливной эмульсии, содержащей 0,2 % КС-18 и 1 % С-5А к седиментации: 1, 2 и 3 — соответственно, 0,5 %, 1,0 % и 2,0 % эмульгатора в топливе; содержание метанола в топливе — 50 %

Для исследований использовались МТЭ с наибольшим содержанием метанола — 50 % — как наиболее неустойчивые. Как видно из графика, содержание ПАВ изменяет время до начала седиментации, но практически не влияет на интенсивность протекания самого процесса. Так, выделение осадка у МТЭ, содержа-

щих 0,5 % ПАВ, начинается через 3 часа после приготовления и заканчивается через 24 часа. У МТЭ, содержащих 1,0 и 2,0 % присадки, явление седиментации несколько позже, но продолжается примерно с одинаковой интенсивностью и одинаковой промежуток времени. Во всех случаях выделение отстоя прекращается через 24...30 часов после приготовления МТЭ и выделения 30 % от первоначальной высоты столба пробы исследуемой метано-топливной эмульсии.

Таким образом, приготавливаемые метано-топливные эмульсии имеют «запас прочности» в течение времени на протекание процесса седиментации, поскольку это ещё не характеризует разделение эмульсии на две фазы. В течение этого времени проба МТЭ может принять однородный состав за счёт лёгкого встряхивания (или вибрации двигателя). После завершения седиментации в пробе метано-топливной эмульсии начинается процесс флокуляции — образование капель составляющих ингредиентов. Дальнейшее увеличение объёма капель и их слипание приводит к завершению процесса коалесценции: разделению дисперсионной среды на метанольную и углеводородную фазы. Для исследуемых метано-топливных эмульсий стабильность коалесценции составила от 4 до 6 суток [155].

### 3.2 Результаты исследований работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и метано-топливной эмульсии

Приготовление метано-топливной эмульсии неизбежно сопровождается нарушением однородности и образованием дисперсионности топливной среды, содержащей в своём объёме наряду с частицами метанола и ДТ мельчайшие частицы воды. Несомненно, присутствие метанола и воды в ДТ вызовет значительные изменения физико-химических свойств нового топлива. Определённое влияние указанного обстоятельства на изменение параметров топливоподачи явилось целью проведённых исследований. Важным условием при этом было сохранение фиксированного положения рейки топливного насоса.

Определённые перед испытаниями значения плотности для



ДТ ( $\rho = 0,82 \text{ г/см}^3$ ) и метанола-топливной эмульсии с содержанием метанола 10, 20, 30 и 40 % практически не отличались друг от друга.

Вязкость метанола-топливной эмульсии с содержанием метанола 10, 20, 30 и 40 % составляла 3,25, 2,95, 2,65 и 2,35 ( $\times 10^{-6}$ )  $\text{м}^2/\text{с}$ , соответственно. Вязкость чистого ДТ, замеренная при той же температуре (298 К), составляла  $3,55 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

При снятии характеристик топливного насоса была использована метанола-топливная эмульсия, содержащая 35 % метанола и чистое ДТ.

В связи с тем, что теплота сгорания у ДТ и МГЭ различна, возникла необходимость изменения закона ввода теплоты при работе на метанола-топливной эмульсии. Для этого нужно было скорректировать угол наклона винтовой канавки плунжера топливного насоса высокого давления, согласно формуле:

$$\alpha_1 = \arctg \left( \frac{\Theta_{ДТ}}{\Theta_{МГЭ}} \cdot \text{tg} \alpha \right), \quad (3.1)$$

где  $\Theta_{ДТ}$ ,  $\Theta_{МГЭ}$  – соответственно, теплота сгорания ДТ и МГЭ;

$\alpha_1$ ,  $\alpha$  – соответственно, угол наклона винтовой канавки плунжера для работы на МГЭ и чистом ДТ.

Согласно формуле (3.1),  $\alpha_1 = 44^\circ$ . На рис. 3.4 приведена скоростная характеристика топливного насоса при включённом регуляторе.

Как видно из графика, кривые изменения  $q_{ци}$  в режиме максимальной подачи при работе насоса на ДТ и МГЭ подобны друг другу. В то же время численные значения  $q_{ци}$  различны. Так, при работе на ДТ в номинальном режиме  $q_{ци} = 58 \text{ мм}^3/\text{ц}$ , а при работе с добавлением метанола  $q_{ци} = 71,5 \text{ мм}^3/\text{ц}$ , но значение теплоты сгорания для того и другого топлив осталось на прежнем уровне и составило  $2465 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ц)}$ . При частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента, наблюдалось увеличение величины цикловой подачи как при работе на ДТ, так и при работе на метанола-топливной эмульсии, и теплота сгорания составила  $2770 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ц)}$ . То же наблюдалось и на других частотах вращения.

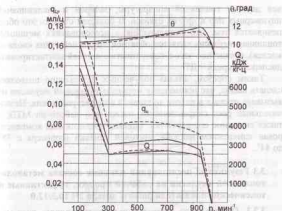


Рис. 3.4. Скоростная характеристика топливного насоса:  $q_{ци}$  – цикловая подача топлива;  $\Theta$  – длительность впрыскивания топлива;  $Q$  – вводимая теплота сгорания за цикл;  $\square$  – дизельное топливо;  $\circ$  – метанола-топливная эмульсия с содержанием метанола 35 %

Длительность впрыскивания топлива растёт с увеличением частоты вращения из-за повышения инерционности всей системы. Однако из-за изменения вязкости растут гидравлические потери и  $\theta$  также снижается на 2...3 % по сравнению с работой на чистом ДТ. Так, при  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$  в режиме максимальной подачи  $\theta = 12^\circ$  для ДТ и  $\theta = 11,7^\circ$  для метанола-топливной эмульсии, т.е. снижение составляет 2,5 %. При увеличении частоты вращения вала насоса до  $930...940 \text{ мин}^{-1}$  вступает в действие всережимный регулятор, что приводит к снижению  $q_{ци}$  и  $\theta$ .

Неравномерность подачи топлива по секциям насоса, рассчитанная по известной зависимости [131], не превышала 2 % для номинального режима, 4 % для других частот вращения в режиме максимальной подачи и 8 % для режима холостого хода, что соответствует ТУ на работу топливной аппаратуры.

В процессе испытаний не наблюдалось повышенных нагре-

вов деталей топливной аппаратуры, задиров и заклиниваний плунжерных пар и других отказов. В большей степени это обеспечивается тем, что используемая в исследованиях метано-топливная эмульсия является обратной эмульсией (типа «вода-в-масле»), вследствие чего с поверхностью деталей контактировала дисперсная среда – ДТ.

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение метано-топливной эмульсии не вызывает отказов в работе топливной аппаратуры дизеля. Незначительный рост гидравлических потерь при работе на МТЭ, а также снижение его расчётной теплоты сгорания был компенсирован изменением наклона винтовой канавки плунжера с  $38^\circ$  до  $44^\circ$ .

### 3.3 Результаты исследований влияния состава метано-топливной эмульсии на рабочий процесс, эффективные и токсические показатели работы дизеля 2Ч 10,5/12,0

#### 3.3.1 Определение оптимальных регулировок системы топливоподачи при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на метано-топливной эмульсии

Работа дизеля на метано-топливной эмульсии должна сопровождаться сохранением его мощностных и экономических показателей, присущих серийному дизелю. Выполнение этого условия может быть обеспечено определением оптимальных регулировок системы топливоподачи и режимов работы дизеля. С этой целью первоначально было установлено влияние состава топлива (по количеству введенного в неё метанола) на значения оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива [145, 147].

На рис. 3.5,а представлено изменение мощностных и экономических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при различных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива и различном содержании метанола в МТЭ для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

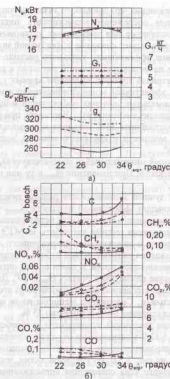


Рис. 3.5. Изменение мощностных, экономических и токсических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ : а – мощностные и эффективные показатели; б – токсические показатели;  $\square$  — дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\triangle$  — 35 % метанола в топливе

Из графика видно, что при работе дизеля на чистом ДТ оптимальным углом опережения впрыскивания топлива является  $\Theta_{\text{опр}} = 30^\circ$ . Увеличение или уменьшение установочного угла от этого значения вызывает снижение эффективной мощности дизеля и повышение эффективного удельного расхода топлива. При работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии с различным содержанием метанола характер изменения кривых удельного расхода топлива, эффективной мощности несколько изменяется.

Так, максимальные значения эффективной мощности достигаются при больших значениях  $\Theta_{\text{опр}}$ . Например, при работе дизеля на МТЭ с содержанием 35% метанола максимальные значения эффективной мощности и крутящего момента достигаются при  $\Theta_{\text{опр}} = 32^\circ \dots 34^\circ$ .

В то же время минимальный  $g_e$  соответствует  $\Theta_{\text{опр}} = 32^\circ$  и составляет 310 г/кВт·ч. При изменении  $\Theta_{\text{опр}}$  в ту или иную сторону  $g_e$  возрастает.

С учётом лучшей экономичности работы дизеля и при максимальном значении эффективной мощности  $N_{\text{е max}} = 18$  кВт угол  $\Theta_{\text{опр}} = 34^\circ$  можно считать оптимальным установочным углом опережения впрыскивания топлива для работы на МТЭ с содержанием 35 % метанола и присадок целенаправленного действия. Однако из-за появления сильных стуков работа дизеля на таком режиме практически невозможна. В связи с этим оптимальным углом в этом случае необходимо считать  $\Theta_{\text{опр}} = 30^\circ$ . Для работы дизеля на эмульсии с содержанием метанола 20 % этот угол также будет оптимальным. Содержание метанола из-за высокой жесткости процесса сгорания было ограничено 35 %.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения 1800 мин<sup>-1</sup> представлено на рис. 3.5,6. Из графиков видно, что при изменении установочного угла опережения впрыскивания топлива содержание сажи в отработавших газах при работе на МТЭ возрастает незначительно, в то время как при работе на ДТ концентрация сажи существенно возрастает. Снижение выбросов сажи при работе на МТЭ на 35...48 % ниже, чем при работе на ДТ. Содержание оксидов азота при работе на МТЭ изменяется по зависимости, аналогичной зависимости дизельного процесса, то есть при

увеличении угла выход оксидов азота возрастает. Работа дизеля на МТЭ сопровождается увеличением выбросов суммарных углеводородов; их содержание в ОГ на 24...37 % больше, чем при работе на ДТ. Изменение концентрации  $\text{CH}_x$  в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе на МТЭ уменьшается при увеличении установочного угла (от 0,26 % при установочном угле 22 градуса п.к.в. до 0,05 % при установочном угле 34 градуса п.к.в.). Изменение же концентрации  $\text{CH}_x$  в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе на ДТ незначительно. Содержание CO в ОГ также снижается при увеличении угла при работе на МТЭ, в то время как при работе на ДТ наблюдается рост выхода CO. При работе дизеля на установочном угле 30...32 градусов п.к.в., CO при работе на МТЭ и ДТ совпадают и равны 0,04...0,05 %. При работе на метаноле-топливной эмульсии больше содержание в ОГ CO<sub>2</sub> во всем диапазоне изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива.

На рисунке 3.6 представлены показатели процесса сгорания дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для номинальной частоты вращения 1800 мин<sup>-1</sup>. Из графиков (рис. 3.6,а) видно, что при работе на МТЭ максимальное давление газов в цилиндре двигателя возрастает пропорционально работе дизеля на чистом ДТ. Так, при угле  $\Theta_{\text{опр}} = 34$  град п.к.в. и содержании в метаноле-топливной эмульсии метанола 20 и 35 % давление, соответственно, равно 8,321 МПа и 8,910 МПа, что, соответственно, на 5 и 13% выше, чем при работе на ДТ. Одновременно резко возрастает «жесткость» процесса сгорания и при  $\Theta_{\text{опр}} = 34$  град п.к.в.  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$  при работе на МТЭ с содержанием метанола 35 % превышает 1 МПа/град. Увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, и степень повышения давления при работе на метаноле-топливной эмульсии. Если при установочном угле опережения впрыскивания топлива 30 град п.к.в. максимальное давление в цилиндре дизеля при работе на дизельном топливе составляет 7,571 МПа, то при работе на МТЭ с содержанием метанола 20 и 35 % - соответственно, 7,725 МПа и 7,866 МПа, что уже на 3,5% выше, чем при работе на дизельном топливе.

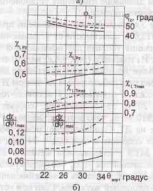
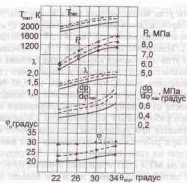


Рис. 3.6. Влияние подачи МТЭ на показатели рабочего процесса дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ : а — показатели процесса сгорания; б — характеристики тепловыделения; — — — — — дизельный процесс; — — — — — 20% метанола в топливе; ······ 35% метанола в топливе

Жесткость процесса сгорания при работе на топливе с содержанием метанола 35% составляет 0,634 МПа/град, что на 37% ниже, чем при установочном угле опережения впрыскивания топлива 34 град п.к.в. [150].

Таким образом, по показателям процесса сгорания для работы на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35% необходимо установить угол  $\theta_{opt} = 30$  град п.к.в., как и при работе на дизельном топливе.

Из характеристик тепловыделения дизеля (рис. 3.6,б) видно, что при работе на МТЭ с содержанием метанола 35% при установочном угле опережения впрыскивания топлива 34 град п.к.в. резко возрастает максимум скорости активного тепловыделения. Так, при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35%  $(\frac{d\lambda}{d\theta})_{max}$  соответственно, составляет 0,117 и 0,156, а при работе на ДТ - 0,075. При установочном угле опережения впрыскивания топлива 30 град п.к.в. скорость активного тепловыделения при работе на МТЭ с содержанием метанола 20 и 35%, соответственно, составляет 0,097 и 0,128. Наблюдается рост величины полезного выделения теплоты при максимальной осредненной температуре газов в цилиндре. Вместе с тем значение  $\varphi_{10}$  при увеличении угла понижается, но лежит выше значений при работе на чистом ДТ.

### 3.3.2 Влияние состава метаноле-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля 24 10,5/12,0

Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии с различным количеством метанола производилось с помощью индицирования на номинальном скоростном режиме при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , а также на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ . Индицирование осуществлялось при определенных оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива и постоянных для каждого из скоростных режимов значениях среднего эффективного давления  $p_e$ .

На рис. 3.7 показаны индикаторные диаграммы дизеля при работе на ДТ и МТЭ различного состава. Анализ полученных ре-

зультатов показывает, что увеличение количества метанола в топливе ведёт к увеличению угла  $\phi_d$ , соответствующего периоду задержки воспламенения. Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ угол  $\phi_d = 24,2$  градуса, а при содержании метанола в топливе 20 и 35 % он равен, соответственно,  $\phi_{d20} = 27,2$  градуса и  $\phi_{d35} = 32$  градуса (рис. 3.7,а).

При работе дизеля в режиме максимального крутящего момента с частотой вращения коленчатого вала  $1400 \text{ мин}^{-1}$  значения угла периода задержки воспламенения меньше, чем на частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Так,  $\phi_d = 22,7$  градуса, а значения углов, соответствующих периоду задержки воспламенения при работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии, равны  $\phi_{d20} = 25,6$  градуса и  $\phi_{d35} = 31$  градус (рис. 3.7,б).

Значения периода задержки воспламенения для частот вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , выраженные во времени, отличаются незначительно, что может быть объяснено лишь небольшой разницей температурных режимов работы дизеля. Рост периода задержки воспламенения обуславливает накопление большого количества топлива, впрыснутого в цилиндр за это время, и увеличение скорости сгорания. В результате повышается жесткость процесса сгорания. Так, при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на дизельном топливе  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,461 \text{ МПа/градус}$ , а при работе на метаноле-топливной эмульсии  $(dp/d\phi)_{\text{max}20} = 0,587 \text{ МПа/градус}$  и  $(dp/d\phi)_{\text{max}35} = 0,634 \text{ МПа/градус}$ .

При частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  жесткость процесса несколько выше. При работе на чистом ДТ  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,517 \text{ МПа/градус}$ , а при работе на МТЭ, соответственно,  $(dp/d\phi)_{\text{max}20} = 0,643 \text{ МПа/градус}$  и  $(dp/d\phi)_{\text{max}35} = 0,679 \text{ МПа/градус}$ .

Жесткость процесса сгорания при работе на МТЭ достаточно сильно возрастает, поэтому предельное содержание метанола в смеси было на данном этапе ограничено 35 %.

Работа дизеля на метаноле-топливной эмульсии сопровождается также некоторым увеличением максимального давления сгорания  $P_Z$ . Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$   $P_{Zd} = 7,571 \text{ МПа}$ ,  $P_{Zd20} = 7,725 \text{ МПа}$  и  $P_{Zd35} = 7,866 \text{ МПа}$  (рис. 3.7,а). Соответственно, при частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$   $P_{Zd} = 7,840 \text{ МПа}$ ,  $P_{Zd20} = 7,973 \text{ МПа}$  и  $P_{Zd35} = 8,010 \text{ МПа}$  (рис. 3.7,б).

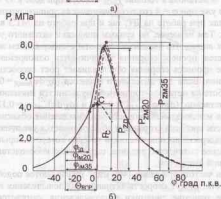
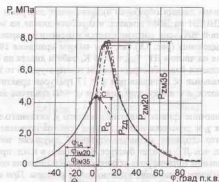


Рис. 3.7. Влияние применения МТЭ на индикаторные диаграммы дизеля 24 10,5/12,0: а -  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}}=30^\circ$ ;  $p_c=0,59 \text{ МПа}$ ; б -  $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}}=30^\circ$ ;  $p_c=0,60 \text{ МПа}$ ;  $\circ$  — а - дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\circ$  — 35 % метанола в топливе

Анализ данных обработки индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ на ЭВМ показал, что работа дизеля на метанолю-топливной эмульсии сопровождается изменением характеристик тепловыделения (рис. 3.8). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ  $T_{\text{max}} = 2124 \text{ К}$ , работа дизеля на МТЭ сопровождается более быстрым ростом температуры, а в то же время максимальные её значения при  $\varphi = 17$  градусов практически не изменяются, а к концу сгорания при  $\varphi = 60$  градусов несколько ниже.

Сравнение кривых выделения теплоты  $\chi$  активного тепловыделения  $\chi_i$  и динамики использования теплоты позволяет заключить, что сгорание метанолю-топливной эмульсии начинается позднее, чем ДТ, но идет быстрее. Например, в в.м.т. при работе на дизельном топливе доля активного тепловыделения составляет 0,1 от общего количества выделенной теплоты. При содержании 20 % метанола в топливе  $\chi_{\text{МЭО}} = 0,03$ , а при доле в 35 % - 0,02. Однако уже при  $\varphi = 8$  градусов значения активного тепловыделения  $\chi_i$  как при работе на ДТ, так и при работе на МТЭ выравниваются. Тем не менее, по кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с содержанием метанола ускоряется, процесс сгорания заканчивается одновременно. Ускорение процесса сгорания обуславливает рост скорости тепловыделения. Если для дизельного процесса  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максДТ}} = 0,061$ , то при работе на метанолю-топливной эмульсии эти значения равны, соответственно,  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максМЭО}} = 0,097$  и  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максМЭС}} = 0,128$ . Увеличение максимальной скорости тепловыделения объясняет рост жесткости процесса сгорания и обуславливается увеличением периода задержки воспламенения, в течение которого впрыскивается большее количество топлива, сгорающего впоследствии с повышенной быстротой.

При частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  наблюдаются подобные зависимости: растут скорость активного тепловыделения и максимальное значение динамики тепловыделения, снижается средняя температура цикла. Как видно,  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максДТ}} = 0,064$ ,  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максМЭО}} = 0,107$  и  $(d\chi/d\varphi)_{\text{максМЭС}} = 0,131$ . Сгорание заканчивается несколько раньше при  $\varphi = 33...38$  градусов (рис. 3.8,б).

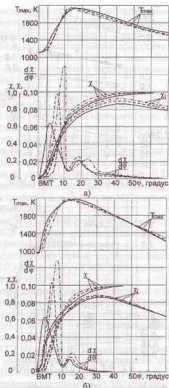


Рис. 3.8. Влияние МТЭ на характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{вдо}} = 30^\circ$ ;  $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{вдо}} = 30^\circ$ ;  $p_c = 0,60 \text{ МПа}$ ;  $\circ - \circ$  - дизельный процесс;  $\circ - \cdots - \circ$  - 20 % метанола в топливе;  $\circ - \cdot - \cdot - \circ$  - 35 % метанола в топливе

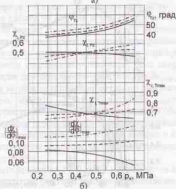
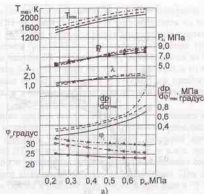


Рис. 3.9. Влияние подачи МТЭ на показатели рабочего процесса дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{вх}} = 30^\circ$  п.к.в.: а — показатели процесса сгорания; б — характеристики тепловыделения;  $\bullet$  — дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\triangle$  — 35 % метанола в топливе

Таким образом, результаты исследований показывают, что применение присадок целенаправленного действия позволяет замедлить рост скорости тепловыделения в первом периоде процесса сгорания без увеличения его общей продолжительности. В результате содержание метанола в топливе может быть увеличено до 35 % при удовлетворительных характеристиках работы дизеля [143, 147, 148].

Показатели процесса сгорания дизеля 24 10,5/12,0 при работе на дизельном топливе и МТЭ в зависимости от нагрузки для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и установочного угла опережения впрыскивания топлива  $30$  градусов (оптимального для ДТ и МТЭ) представлены на рис. 3.9, а. Из графиков видно, что максимальное давление газов в цилиндре дизеля и степень повышения давления при работе на МТЭ выше, чем при работе на ДТ на режиме номинальной нагрузки. На нагрузке от  $0,23 \text{ МПа}$  до  $0,46 \text{ МПа}$  максимальное давление газов в цилиндре дизеля и степень повышения давления при работе на МТЭ лежат несколько ниже, чем при работе на ДТ.

Максимальная осредненная температура газов в цилиндре при работе на МТЭ превышает значения дизельного процесса во всем диапазоне изменения нагрузок.

Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при работе на МТЭ выше, чем при дизельном процессе, во всем диапазоне изменения нагрузок.

При дизельном процессе жесткость процесса сгорания снижается с максимального значения на максимальной нагрузке ( $0,65 \text{ МПа/градус}$  при среднем эффективном давлении  $0,69 \text{ МПа}$ ) до минимального значения при минимальной нагрузке ( $0,21 \text{ МПа/градус}$  при среднем эффективном давлении  $0,23 \text{ МПа}$ ). При работе на МТЭ жесткость процесса сгорания увеличивается при увеличении нагрузки. Так, если при среднем эффективном давлении  $0,23 \text{ МПа}$  и содержании метанола в топливе 35 % жесткость процесса сгорания составляет  $0,33 \text{ МПа/градус}$ , то при нагрузке  $0,69 \text{ МПа}$  жесткость составляет уже  $1,22 \text{ МПа/градус}$ . Резкое увеличение жесткости процесса сгорания при работе на МТЭ происходит при нагрузке свыше  $0,61 \text{ МПа}$ . При содержании же метанола в топливе 20 % жесткость процесса сгорания пропорциональна дизельному процессу, однако выше его.

При номинальной нагрузке 0,59 МПа жесткость процесса сгорания при работе на МТЭ с содержанием метанола 35 % составляет 0,634 МПа/градус, что выше жесткости при работе на ДТ на 27 %.

Характеристики тепловыделения дизеля 24 10,5/12,0 при работе на ДТ и МТЭ при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива 30 градусов в зависимости от изменения нагрузки представлены на рис. 3.9,6. Из графиков видно, что при работе на МТЭ характеристики тепловыделения несколько отличаются от характеристик при работе на ДТ.

Так, если при работе на ДТ максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается с 0,11 при среднем эффективном давлении 0,23 МПа до 0,05 при 0,69 МПа, то при работе на МТЭ с содержанием метанола в топливе 35 % скорость активного тепловыделения увеличивается с 0,11 при 0,23 МПа до 0,13 при среднем эффективном давлении 0,69 МПа. При содержании же метанола в топливе 20 % скорость активного тепловыделения с увеличением нагрузки изменяется незначительно. Значения активного выделения тепла при максимальном давлении в цилиндре, при максимальной осредненной температуре в цилиндре изменяются аналогично значениям скорости активного тепловыделения, однако до значения среднего эффективного давления в цилиндре 0,45 МПа эти кривые при работе на ДТ лежат выше кривых при работе на МТЭ, при давлении 0,45 МПа - выравниваются, а при увеличении нагрузки лежат ниже аналогичных кривых при работе на метанолю-топливной эмульсии. Значения  $\phi_{\text{акт}}$  при работе на ДТ лежат ниже значений, чем при работе на МТЭ во всем диапазоне изменения нагрузки.

Показатели процесса сгорания дизеля 24 10,5/12,0 при работе на ДТ и МТЭ, нагрузки для частоты 1400 мин<sup>-1</sup> и установочного угла опережения впрыскивания топлива 30 градусов представлены на рис. 3.10,а. Из графиков видно, что при работе на МТЭ относительно частоты вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  сокращается величина угла, соответствующая периоду задержки воспламенения во всем диапазоне нагрузок [177].

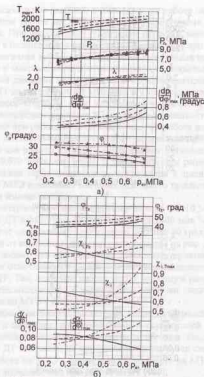


Рис. 3.10. Влияние подачи МТЭ на показатели рабочего процесса дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{впр}} = 30$  н.к.в.: а - показатели процесса сгорания; б - характеристики тепловыделения; — — — — — дизельный процесс; - - - - - 20 % метанола в топливе; - · - · - · 35 % метанола в топливе



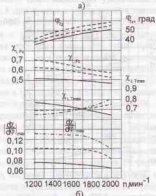
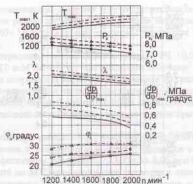


Рис. 3.11. Влияние подачи МТЭ на показатели рабочего процесса дизеля 2С 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при  $\theta_{\text{впрыск}} = 30$  л.к.в.: а - показатели процесса сгорания; б - характеристики тепловыделения;  $\square$  -  $\square$  - дизельный процесс;  $\circ$  -  $\circ$  - 20 % метанола в топливе;  $\bullet$  -  $\bullet$  - 35 % метанола в топливе

Максимальное давление в цилиндре при работе на МТЭ ниже, чем при работе на ДТ до среднего эффективного давления 0,41 МПа. При дальнейшем увеличении нагрузки максимальное давление в цилиндре при работе на МТЭ выше, чем при работе на ДТ. Аналогичная картина наблюдается и для степени повышения давления и максимальной жесткости процесса сгорания. Степень повышения давления при работе на МТЭ ниже значений при работе на ДТ до нагрузки 0,42 МПа, как и у максимальной жесткости процесса сгорания. При дальнейшем увеличении нагрузки степень повышения давления и максимальная жесткость процесса сгорания при работе на МТЭ выше, чем при работе на ДТ.

Так, жесткость процесса сгорания на номинальной нагрузке 0,59 МПа для работы на МТЭ с содержанием метанола 35 % составляет 0,679 МПа, что на 24 % выше, чем при работе на ДТ. Максимальная осредненная температура газов в цилиндре при работе на МТЭ превышает значения дизельного процесса во всем диапазоне изменения нагрузок.

Характеристики тепловыделения дизеля 2С 10,5/12,0 при работе на ДТ и МТЭ при частоте вращения 1400  $\text{мин}^{-1}$  и установившем угле опережения впрыскивания топлива 30 градусов в зависимости от изменения нагрузки представлены на рис. 3.10,б. Из графиков видно, что при работе на МТЭ характеристики тепловыделения отличаются от характеристик тепловыделения при работе на ДТ. Так, если при работе на ДТ максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается, то при работе на МТЭ - увеличивается.

Значения активного выделения тепла при максимальном давлении в цилиндре, при максимальной осредненной температуре в цилиндре изменяются аналогичным образом. Так, если при работе на ДТ эти значения при увеличении нагрузки снижаются, то при работе на МТЭ - возрастают. При работе на МТЭ  $\phi_{\text{акт}}$  лежит выше значений, чем при работе на ДТ [180].

Показатели процесса сгорания дизеля при работе на ДТ и МТЭ с содержанием метанола 20 и 35 %, установившем угле опережения впрыскивания топлива 30 градусов в зависимости от частоты вращения представлены на рис. 3.11,а. Из графиков видно, что все показатели процесса сгорания при работе на метано-

ло-топливной эмульсии лежат выше тех же показателей при работе на ДТ во всем диапазоне частот вращения. Характер изменения всех показателей при работе на МТЭ в зависимости от частоты вращения полностью повторяет характер изменения при работе на чистом дизельном топливе.

Характеристики тепловыделения дизеля 24 10,5/12,0 при работе на чистом ДТ и МТЭ с содержанием метанола 20 и 35 % для установочного угла опережения впрыскивания топлива 30 градусов в зависимости от частоты вращения представлены на рис. 3.11,б. Из графиков видно, что скорость активного тепловыделения при работе на МТЭ выше, чем при работе на ДТ, во всем скоростном диапазоне. Это характерно и для активного тепловыделения в характерных точках, максимальном давлении в цилиндре, в.м.т.,  $\phi_{тз}$ . Только активное тепловыделение при максимальной средней температуре газов в цилиндре при работе на метано-топливной эмульсии имеет отличный, противоположный характер, чем при работе на ДТ. При частоте вращения, близкой к 1700  $\text{мин}^{-1}$ , доля активного тепловыделения при максимальной средней температуре газов в цилиндре при работе на ДТ и МТЭ примерно одинакова и составляет 0,71.

### 3.3.3 Влияние состава метано-топливной эмульсии на эффективные показатели работы дизеля 24 10,5/12,0

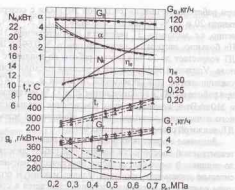
Влияние состава метано-топливной эмульсии оценивалось по нагрузочным характеристикам, снятым на номинальном скоростном режиме 1800  $\text{мин}^{-1}$  и на режиме максимального крутящего момента 1400  $\text{мин}^{-1}$ , а также по скоростным характеристикам на номинальной нагрузке при оптимальном установочном угле впрыскивания топлива  $\Theta_{впр} = 30$  град. п.к.в.

На рис. 3.12,а представлены нагрузочные характеристики дизеля 24 10,5/12,0 при работе на ДТ и МТЭ различного состава при 1800  $\text{мин}^{-1}$ . Как видно из графиков, во всем диапазоне изменения нагрузки растет суммарный часовой расход топлива при работе на МТЭ. В то же время расход ДТ уменьшается за счет замещения его метанолом. Так, на номинальной нагрузке при  $p_c = 0,59$  МПа и работе по дизельному процессу  $G_{дт} = 4,55$  кг/ч, а

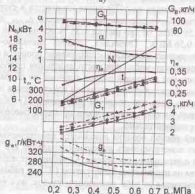
при работе на метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 % расход ДТ составляет 4,1 и 3,7 кг/ч, соответственно, т.е. экономия ДТ равняется, соответственно, 11 % и 19 %. На больших нагрузках, например при  $p_c = 0,69$  МПа, экономия ДТ возрастает до 23 % в случае работы на топливе с 35 % метанола. Удельный эффективный и часовой расходы топлива также увеличиваются: для дизельного процесса  $g_{e\text{диз}} = 247$  г/кВт·ч, а при работе на МТЭ с содержанием 20 и 35 % метанола  $g_{e\text{диз}} = 278$  и 310 г/кВт·ч, соответственно. Увеличение удельного эффективного и часового расходов топлива объясняется меньшей, чем у ДТ, теплотой сгорания метанола [147].

Значение эффективного к.п.д., учитывающего использование теплотворной способности топлива при работе дизеля на метано-топливной эмульсии, остаётся практически неизменным относительно дизельного процесса. Однако максимум его с увеличением количества метанола в топливе сдвигается в сторону меньших нагрузок. Минимум удельного эффективного расхода топлива при работе дизеля на МТЭ также сдвигается в сторону меньших нагрузок. Если при дизельном процессе  $g_{e\text{диз}}$  достигается при  $p_c = 0,59$  МПа, то при работе с 35 % метанола он соответствует  $p_c = 0,56$  МПа. Очевидно, подача метано-топливной эмульсии нарушает оптимальное протекание процесса смесеобразования, имеющего место при чисто дизельном процессе, вследствие увеличения цикловой подачи топлива, но сохранения вихреобразующей способности впускного тракта дизеля на прежнем уровне. Ввиду того что введение метанола в ДТ облегчает его фракционный состав, оптимальность процесса смесеобразования изменяется незначительно.

Часовой расход воздуха изменяется неоднозначно, но в целом можно констатировать хорошее совпадение его значений в сравнении с дизельным процессом. Коэффициент избытка воздуха при этом не изменяется. Температура ОГ при работе дизеля на МТЭ уменьшается во всем диапазоне нагрузок, но с увеличением нагрузки это уменьшение заметнее.



а)



б)

Рис. 3.12. Нагрузочные характеристики дизеля 2Ч 10,5/12,0:  
а)  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б)  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — — — дизельный процесс; - - - - - 20 % метанола в топливе; - · - · - 35 % метанола в топливе

Если при  $p_e = 0,24 \text{ МПа}$   $t_i = 260^\circ \text{С}$  для дизельного процесса и, соответственно,  $240^\circ \text{С}$  и  $220^\circ \text{С}$  для топлива с 20 и 35 % метанола, то при  $p_e = 0,59 \text{ МПа}$   $t_i = 460^\circ \text{С}$  для дизельного процесса и  $440^\circ \text{С}$  и  $400^\circ \text{С}$  для вышеуказанных МТЭ. Таким образом, снижение температуры растёт с  $20^\circ$  до  $60^\circ$ .

Характер влияния метанола-топливной эмульсии на эффективные показатели дизеля сохраняется и на другом режиме работы: при частоте вращения колесчатого вала  $1400 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 3.12, б). Из графиков видно, что во всём диапазоне изменения нагрузки суммарный часовой расход топлива при работе дизеля на метанола-топливной эмульсии увеличивается, а расход ДТ снижается. Так, при  $p_e = 0,3 \text{ МПа}$  и содержании 35 % метанола в топливе расход чистого ДТ составляет  $1,85 \text{ кг/ч}$ , т.е. его экономия составляет 15,9 %, при  $p_e = 0,6 \text{ МПа}$  экономия ДТ составляет 17,5 %. Минимум удельного эффективного расхода топлива для дизельного процесса достигается при  $p_e = 0,60 \text{ МПа}$  и составляет  $g_{e \text{ min}} = 247 \text{ г/кВт·ч}$ . При работе дизеля на МТЭ этот минимум также сдвигается в сторону меньших нагрузок. Так, для топлива с 20 % метанола  $g_{e \text{ min}} = 268 \text{ г/кВт·ч}$  при  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$  и для топлива с 35 % метанола  $g_{e \text{ min}} = 304 \text{ г/кВт·ч}$  при  $p_e = 0,55 \text{ МПа}$ . Максимум эффективного к.п.д. также несколько смещается в сторону меньших нагрузок при работе его на метанола-топливной эмульсии. Коэффициент наполнения не изменяется во всём диапазоне нагрузок по отношению к значениям при дизельном процессе.

Применение метанола-топливной эмульсии способствует снижению температуры ОГ во всём диапазоне нагрузок, причём с увеличением содержания метанола в топливе и повышением нагрузки это снижение заметно.

Влияние присутствия метанола в топливе на изменение эффективных показателей дизеля можно рассмотреть и по скоростным характеристикам на номинальной нагрузке (рис. 3.13). Из графиков видно, что работа дизеля на метанола-топливной эмульсии не изменяет его эффективных показателей, т.к. кривые значений эффективной мощности, крутящего момента и эффективного к.п.д. совпадают с аналогичными кривыми для дизельного процесса. Незначительно изменяются часовой расход воздуха и коэффициент наполнения. Часовой расход ДТ при работе на

МТЭ уменьшается во всём диапазоне изменения частот вращения. Так, при  $1400 \text{ мин}^{-1}$  экономия ДТ составляет по сравнению с дизельным процессом 17,4 %, а при  $1800 \text{ мин}^{-1}$  – 19 % в случае введения в топливо 35 % метанола.

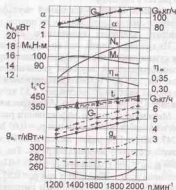


Рис. 3.13. Скоростные характеристики дизеля 24 10,5/12,0: — — — — — дизельный процесс; - - - - - 20 % метанола в топливе; - · - · - · 35 % метанола в топливе

Минимум удельного эффективного расхода топлива смещается в сторону меньших частот вращения, т.к. присутствие метанола в топливе облегчает этот фракционный состав и уменьшает значение потребной скорости воздуха на впуске.

Температура ОГ при работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии ниже соответствующих значений для дизельного процесса во всём диапазоне частот вращения. В результате снижается тепловая напряжённость цилиндропоршневой группы и появляется возможность форсирования дизеля по среднему эффективному давлению, не снижая показателей его долговечности [138].

### 3.3.4 Влияние состава метаноле-топливной эмульсии на показатели дымности и токсичности отработавших газов дизеля 24 10,5/12,0

Для определения показателей дымности и токсичности одновременно со снятием скоростных и нагрузочных характеристик производился анализ проб ОГ дизеля [153]. Влияние метаноле-топливной эмульсии с процентным содержанием метанола 20 и 35 % на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  представлено на рис.3.14,а.

Как видно из графиков, содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ уменьшается наполовину при работе на метаноле-топливной эмульсии. Так, на номинальном режиме при  $p_e = 0,59 \text{ МПа}$  концентрация  $\text{NO}_x$  в ОГ для дизельного процесса составляет 0,036 %, а для топлива, содержащего 35 % метанола, это значение равно 0,014 %, причём с увеличением нагрузки эта разница увеличивается. Согласно термической природе образования оксидов азота  $\text{NO}_x$ , их эмиссия находится в прямой зависимости от содержания свободного кислорода в пламени при условии достаточной высокой его температуры. Снижение локальной и средней температур цикла в случае работы на МТЭ непосредственно обуславливает снижение эмиссии оксидов азота. В то же время концентрация  $\text{NO}_x$  находится в прямой зависимости от величины нагрузки, т.к. параллельно с нагрузкой растёт температура ОГ.

Содержание сажи в ОГ снижается в случае работы дизеля на МТЭ по сравнению с дизельным процессом. Так, увеличение нагрузки от  $p_e = 0,23 \text{ МПа}$  до  $p_e = 0,70 \text{ МПа}$  влечёт за собой рост выброса сажи от 1,8 до 6,3 ед. bosch, в то время как работа на метаноле-топливной эмульсии сопровождается меньшей эмиссией сажи во всём диапазоне нагрузок. Снижение, как и следовало ожидать, вызывается меньшей склонностью к дымлению спиртов в сравнении с ДТ. Так, на номинальном скоростном режиме при  $p_e = 0,59 \text{ МПа}$  уменьшение выбросов сажи с ОГ составляет, соответственно, 36 % и 53 % для случаев содержания в топливе 20 и 35 % метанола.

Уровень концентрации CO в ОГ практически не отличается от его значения для серийного дизеля, и лишь при нагрузках вы-

ше номинальной, несколько возрастает. Согласно классической схемы образования оксида CO и диоксида CO<sub>2</sub> углерода, весь образующийся в пламени углерод окисляется в CO, и лишь затем, при наличии кислорода, превращается в CO<sub>2</sub> [127]:



Снижение коэффициента избытка воздуха при высоких нагрузках (см. рис. 3.12) и обуславливает недоокисление CO.

В результате протекания указанных процессов концентрация CO<sub>2</sub> в ОГ меняется неоднородно. Так, при повышении  $p_c$  от 0,23 МПа до 0,70 МПа содержание CO<sub>2</sub> увеличивается от 3,77 % до 9,13 % для дизельного процесса и от 3,91 % до 9,88 % для работы на топливе с 35 % метанола.

Содержание суммарных углеводородов CH<sub>x</sub> в ОГ несколько возрастает при работе на метаноле-топливной эмульсии. Реплавающее значение в этом случае оказывает ускорение процесса горения, снижение средней температуры цикла и, как следствие, температуры ОГ. В итоге на номинальном режиме при  $p_c = 0,59$  МПа концентрация CH<sub>x</sub> увеличивается от 0,05 % для дизельного процесса до 0,12 % для случая с 35 % метанола в топливе.

На рис. 3.14,6 представлено содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при частоте вращения коленчатого вала 1400 мин<sup>-1</sup>. Анализ данных показывает, что работа дизеля на метаноле-топливной эмульсии сопровождается уменьшением выброса оксидов азота NO<sub>x</sub> и сажи во всем диапазоне нагрузок по сравнению с работой на чистом ДТ. Так, при  $p_c = 0,23$  МПа при содержании метанола в топливе 35 % снижение выбросов NO<sub>x</sub> составляет 45...60 %, сажи - 65...72 %, а при  $p_c = 0,70$  МПа это снижение, соответственно, составляет 42...64 % для NO<sub>x</sub> и 32...39 % для сажи.

Концентрация оксида углерода CO в ОГ дизеля остаётся на уровне дизельного процесса и составляет 0,02...0,05 %. Лишь при достижении достаточно больших нагрузок эмиссия CO значительно увеличивается. Так, при  $p_c = 0,64$  МПа содержание CO достигает 0,2 %.

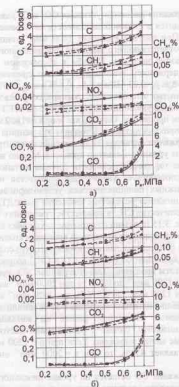


Рис. 3.14. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки: а -  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>; —○— дизельный процесс; - - -○- 20 % метанола в топливе; - · - · -○- 35 % метанола в топливе

Содержание диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в ОГ, как уже отмечалось, находится в сложной зависимости от параметров процесса сгорания. При частоте вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  концентрация  $\text{CO}_2$  меньше соответствующего значения для дизельного процесса во всём диапазоне нагрузок. Причём в абсолютном значении для МТЭ с содержанием метанола 35 % это снижение составляет  $0,2...0,3 \%$  для  $p_c=0,23 \text{ МПа}$  и  $0,6...0,8 \%$  для  $p_c=0,70 \text{ МПа}$ .

Количество несгоревших суммарных углеводородов  $\text{CH}_x$  также несколько увеличивается при работе на МТЭ по сравнению с дизельным процессом. Однако, как и при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ , с увеличением количества метанола в топливе эта разница уменьшается, а при содержании метанола 35 % значения концентрации  $\text{CH}_x$  сохраняется на уровне дизельного процесса. Можно заключить, что несмотря на то, что рост скорости горения метанола-топливной эмульсии способствует увеличению количества неуславившихся сгореть сложных полициклических углеводородов, суммарный их вывод снижается вследствие снижения доли ДТ, образующей основное количество  $\text{CH}_x$ , в количестве суммарного топлива.

На рис. 3.15 показано содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала.

Анализ полученных данных показывает, что содержание всех токсичных компонентов (за искл.  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_x$ ) возрастает с увеличением частоты вращения. Так, содержание  $\text{NO}_x$  увеличивается с  $0,025 \%$  при  $1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $0,031 \%$  при  $2000 \text{ мин}^{-1}$  в случае ДТ и с  $0,012 \%$  при  $1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $0,016 \%$  при  $2000 \text{ мин}^{-1}$  в случае работы на метанола-топливной эмульсии с 35 % метанола.

Содержание сажи при работе на метанола-топливной эмульсии снижается, однако с увеличением частоты вращения это снижение менее выражено. Если при  $n=1200 \text{ мин}^{-1}$  это снижение составляет 45 %, то при  $n=2000 \text{ мин}^{-1}$  оно составляет 34 %.

Содержание  $\text{CO}$  остаётся на уровне дизельного процесса и лишь с повышением частоты вращения несколько увеличивается; содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_x$  повышается незначительно.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет утверждать, что применение МТЭ с присадками целенаправленного действия в качестве топлива для дизелей существенно снижает эмиссию в ОГ основных токсичных компонентов – сажи и

оксидов углерода. Это утверждение справедливо на всех исследуемых скоростных и нагрузочных режимах.

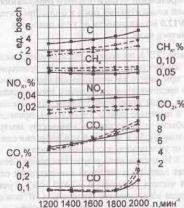


Рис. 3.15. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала:  $\square$  — дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\triangle$  — 35 % метанола в топливе

Содержание других токсичных компонентов – диоксида углерода и суммарных углеводородов – остаётся на уровне дизельного процесса или увеличивается, но незначительно.

### 3.4 Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0

#### 3.4.1 Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от угла поворота коленчатого вала

В Вятской ГСХА проводятся исследования, связанные с определением дымности и токсичности ОГ тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метанолю-топливной эмульсии [154]. Для полного представления о процессах, происходящих в цилиндре двигателя, были проведены расчеты относительного содержания сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0, приведенные к постоянному объему и отнесенные к количеству поступающего в цилиндр топлива  $N_T$ , %, и массовой концентрации сажи  $C_M$ , г/м<sup>3</sup> в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

На рис. 3.16,а приведены результаты расчета относительного содержания сажи  $N_T$  и массовой концентрации сажи  $C_M$  при номинальной частоте вращения  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup> и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta = 30^\circ$  поворота коленчатого вала при работе на дизельном топливе и метанолю-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 %.

В ряде исследований, связанных с изучением образования и окисления сажи в пламени, было показано, что начало формирования сажистых частиц совпадает с началом диффузионного горения. При этом их концентрация в период впрыска топлива быстро нарастает, достигая своего максимума в конце топливноподачи [120].

Массовая концентрация сажи при работе на ДТ составляет  $C_M = 0,38$  г/м<sup>3</sup>, а при работе на метанолю-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $C_M = 0,21$  г/м<sup>3</sup>. Меньшее содержание сажи в цилиндре дизеля при работе на МТЭ можно объяснить тем, что отношение Н/С метанола равно 3, а, как известно, при уменьшении этого отношения склонность к сажеобразованию уменьшается.

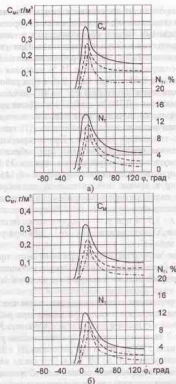


Рис. 3.16. Показатели массовой концентрации и относительного содержания сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от угла поворота коленчатого вала: а -  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>;  $\square$  — дизельный процесс;  $\circ$  — — — 20 % метанола в топливе;  $\triangle$  — — — 35 % метанола в топливе

Далее происходит интенсивное окисление сажевых частиц (углеродных комплексов), из чего вытекает преимущественное выгорание сажевых частиц, образовавшихся в цилиндре дизеля, что характеризуется избытком окислителя. При углах поворота коленчатого вала с  $11^\circ$  до  $60^\circ$  при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % массовая концентрация сажи снижается с  $0,21 \text{ г/м}^3$  до  $0,05 \text{ г/м}^3$ , а при работе на ДТ при углах поворота коленчатого вала с  $5^\circ$  до  $40^\circ$  массовая концентрация сажи снижается с  $0,38 \text{ г/м}^3$  до  $0,22 \text{ г/м}^3$ . Далее при увеличении угла поворота коленчатого вала массовая концентрация сажи меняется незначительно как при работе на ДТ, так и при работе на метаноле-топливной эмульсии. При открытии выпускного клапана массовая концентрация сажи при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % составляет  $0,045 \text{ г/м}^3$ , а при работе на дизельном топливе -  $0,145 \text{ г/м}^3$ .

Анализируя кривые относительного сажеобразования  $N_T$ , видим, что в цилиндре дизеля при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % происходит рост содержания сажи до 9,3 % при угле поворота коленчатого вала  $20^\circ$ , а при работе на ДТ, соответственно, до 13,9 % при угле поворота коленчатого вала  $15^\circ$ .

Меньшее относительное содержание сажи при работе на МТЭ можно объяснить тем, что в молекуле метанола содержится кислород, который положительно влияет на снижение сажеобразования.

Далее происходит интенсивное окисление сажи и ее выгорание. Содержание сажи в цилиндре дизеля при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35% снижается с 9,3 % до 2 %, соответственно, при увеличении угла поворота коленчатого вала с  $20^\circ$  до  $80^\circ$ , а при работе на ДТ с 13,9 % до 6 % при увеличении угла с  $15^\circ$  до  $60^\circ$  п.к.а. Это также характеризуется повышенным содержанием окислителя. С увеличением угла поворота коленчатого вала относительное содержание сажи в цилиндре уменьшается незначительно и при открытии выпускного клапана при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $N_T = 1,4 \%$ , а при работе на ДТ -  $N_T = 4,6 \%$ .

На рис. 3.16,б приведены результаты расчета относительного содержания сажи  $N_T$  и массовой концентрации сажи  $C_M$  на ре-

жиме максимального крутящего момента  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta = 30^\circ$  поворота коленчатого вала при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на дизельном топливе и метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 % в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Массовая концентрация сажи при работе дизеля на ДТ составляет  $C_M = 0,330 \text{ г/м}^3$ , а при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $C_M = 0,200 \text{ г/м}^3$ . Далее происходит интенсивное окисление сажевых частиц (углеродных комплексов), из чего вытекает преимущественное выгорание сажевых частиц, образовавшихся в цилиндре ДВС.

Из графиков видно, что при работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии происходит более интенсивное выгорание сажевых частиц, что характеризуется также избытком окислителя. При открытии выпускного клапана массовая концентрация сажи при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % составляет  $0,02 \text{ г/м}^3$ , а при работе на дизельном топливе -  $0,09 \text{ г/м}^3$ .

Анализируя кривые относительного сажеобразования  $N_T$  видим, что происходит рост содержания сажи до 8,1 % при угле поворота коленчатого вала  $16^\circ$  в цилиндре при работе дизеля на МТЭ с содержанием метанола 35 %, а при работе на ДТ, соответственно, до 12,1 % при угле поворота коленчатого вала  $8^\circ$ .

Далее происходит интенсивное окисление сажи и ее выгорание. Относительное содержание сажи в цилиндре дизеля при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % снижается до 1,0 %, а при работе на ДТ до 3,9 % при открытии выпускного клапана. Это характеризуется также избытком окислителя в молекуле МТЭ.

#### 3.4.2 Определение относительного содержания в массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива

На рис. 3.17 приведены результаты расчета относительного содержания сажи  $N_T$  и массовой концентрации сажи  $C_M$  в зави-



сности от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива при частоте вращения коленчатого вала двигателя, соответствующей номинальной частоте вращения при работе на дизельном топливе и метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 %.

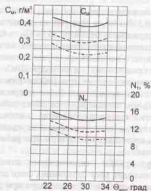


Рис. 3.17. Показатели массовой концентрации и относительного содержания в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива:  $\circ$ — $\circ$  — дизельный процесс;  $\square$ — $\square$  — 20 % метанола в топливе;  $\triangle$ — $\triangle$  — 35 % метанола в топливе

При анализе кривых массовой концентрации сажи видно, что увеличение угла опережения впрыскивания топлива, равно как и его уменьшение, сопровождается некоторым возрастанием максимальной массовой концентрации сажи при смещении максимума в сторону ВМТ. Так, при угле  $\Theta_{впр} = 34^\circ$  п.к.в. при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35% массовая концентрация сажи достигает  $C_{Mmax} = 0,24$  г/м³, в то время как при работе на дизельном топливе  $C_{Mmax} = 0,41$  г/м³, при  $\Theta_{впр} = 22^\circ$  п.к.в. при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % массовая концентрация сажи равна

$C_{Mmax} = 0,28$  г/м³, а при работе на дизельном топливе  $C_{Mmax} = 0,44$  г/м³. Минимум массовой концентрации сажи достигается при угле опережения впрыскивания топлива, равном  $32^\circ$  п.к.в., и составляет при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $0,21$  г/м³, а при работе на ДТ при  $\Theta_{впр} = 30^\circ$  п.к.в. —  $0,38$  г/м³.

Анализируя кривые при положении, когда открывается выпускной клапан  $C_{Mmin}$ , видим, что кривые массовой концентрации сажи при работе на метаноле-топливной эмульсии располагаются ниже кривой, соответствующей работе на ДТ. При этом характер кривых не изменился. При увеличении угла  $\Theta_{впр}$  как и при его уменьшении, происходит увеличение массовой концентрации сажи. Минимум соответствует  $\Theta_{впр} = 30^\circ$  п.к.в. и составляет при работе на дизельном топливе  $0,145$  г/м³, а при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $\Theta_{впр} = 32^\circ$  п.к.в. и составит  $0,0015$  г/м³.

При анализе кривых относительного содержания сажи  $N_{tmax}$  видно, что с увеличением установочного угла опережения впрыскивания топлива, как и при уменьшении его относительно оптимального угла, происходит увеличение относительного сажеосодержания в ту и другую сторону. Минимум достигается при  $\Theta_{впр} = 30^\circ$  п.к.в. и составляет при работе на метаноле-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %  $N_{tmax} = 9,3$  %, при работе на ДТ — 13,9 %.

#### 3.4.3 Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки и частоты вращения

Кривые содержания массовой концентрации и относительного сажеосодержания в зависимости от нагрузки на номинальной частоте вращения дизеля 2Ч 10,5/12,0 и установочном угле опережения впрыскивания топлива, равном 30 градусам п.к.в., представлены на рис. 3.18,а.

Из графиков видно, что кривая массовой концентрации сажи при максимальных значениях ниже при работе на метаноле-

топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % и изменяется в пределах от 0,17 г/м<sup>3</sup> при эффективном давлении, соответствующем 0,23 МПа, до 0,25 г/м<sup>3</sup>, соответственно, при 0,69 МПа. При работе двигателя на дизельном топливе происходит увеличение массовой концентрации сажи в диапазоне нагрузок от 0,23 до 0,69 МПа, соответственно, с 0,26 г/м<sup>3</sup> до 0,43 г/м<sup>3</sup>.

При работе дизеля на метано-топливной эмульсии происходит более интенсивное выгорание и окисление сажевых частиц, поэтому кривая массовой концентрации сажи при минимальных значениях  $S_{M\min}$  лежит ниже, чем при работе на дизельном топливе, и изменяется, соответственно, в пределах от 0,02 г/м<sup>3</sup> до 0,08 г/м<sup>3</sup> при работе на МТЭ с содержанием метанола 35 % и от 1,1 до 1,7 г/м<sup>3</sup> при работе на ДТ.

Анализируя кривые относительного содержания сажи  $N_T$ , видим, что при возрастании нагрузки происходит увеличение относительного сажевого содержания как при работе на МТЭ, так и при работе на ДТ: в пределах от 11,5 до 15,0 % при работе на дизельном топливе и от 8,2 до 10,3 % при работе на метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %.

Анализ кривых относительного содержания сажи, соответствующих минимальным значениям  $N_{T\min}$  показывает, что при работе на метано-топливной эмульсии кривая лежит ниже, чем при работе на ДТ, и составляет при нагрузке  $p_e = 0,23$  МПа 0,2 % при работе на МТЭ с содержанием метанола 35 % и 3,3 % при работе на дизельном топливе, а при нагрузке  $p_e = 0,69$  МПа - 2,4 % и 6,0 %, соответственно.

На рис. 3.18,б представлены кривые относительного содержания и массовой концентрации сажи дизеля 24 10,5/12,0 при работе на ДТ и метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 % при частоте вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту, и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta = 30$  градусов п.к.в.

Из графиков видно, что кривая массовой концентрации сажи при максимальных значениях ниже при работе на метано-топливной эмульсии и изменяется в пределах для эмульсии с содержанием метанола 35 % от 0,16 г/м<sup>3</sup> при эффективном давлении, соответствующем 0,23 МПа, до 0,24 г/м<sup>3</sup>, соответственно, при 0,69 МПа. При работе дизеля на дизельном топливе проис-

ходит увеличение массовой концентрации сажи в диапазоне нагрузок от 0,23 до 0,69 МПа, соответственно, с 0,23 г/м<sup>3</sup> до 0,36 г/м<sup>3</sup>.

При работе дизеля на метано-топливной эмульсии происходит более интенсивное выгорание и окисление сажевых частиц, поэтому кривая массовой концентрации сажи при минимальных значениях  $S_{M\min}$  лежит ниже, чем при работе на дизельном топливе, и изменяется, соответственно, в пределах от 0,02 г/м<sup>3</sup> до 0,04 г/м<sup>3</sup> при работе на МТЭ с содержанием метанола 35 % и от 0,07 до 0,13 г/м<sup>3</sup> при работе на ДТ.

Анализируя кривые относительного содержания сажи  $N_T$ , видим, что при возрастании нагрузки происходит увеличение относительного сажевого содержания как при работе на метано-топливной эмульсии, так и при работе на ДТ: в пределах от 10,2 до 14,0 % при работе на дизельном топливе и от 7,3 до 9,5 % при работе на метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 %, соответственно.

Анализ кривых относительного содержания сажи, соответствующих минимальным значениям  $N_{T\min}$  показывает, что при работе на МТЭ кривая лежит ниже, чем при работе на ДТ, и составляет при нагрузке  $p_e = 0,23$  МПа 0,2 % при работе на метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 % и 2,5 % при работе на дизельном топливе, а при нагрузке  $p_e = 0,69$  МПа - 2,1 % и 4,7 %, соответственно.

На рис. 3.19 представлены кривые относительного содержания и массовой концентрации сажи дизеля 24 10,5/12,0 при работе на ДТ и метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 20 и 35 % в зависимости от изменения частоты вращения и установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta = 30$  градусов п.к.в. При увеличении частоты вращения во всем рассматриваемом диапазоне изменения частот вращения содержание массовой концентрации сажи при максимальных значениях ниже при работе на метано-топливной эмульсии и составляет для эмульсии с содержанием метанола 35 % от 0,17 до 0,24 г/м<sup>3</sup>, тогда как при работе на дизельном топливе от 0,32 до 0,40 г/м<sup>3</sup>, соответственно, при изменении частоты вращения от 1200 мин<sup>-1</sup> до 2000 мин<sup>-1</sup>. Также изменяется и  $S_{M\min}$ , увеличивается с возрастанием частоты вращения, но кривая массовой концентрации

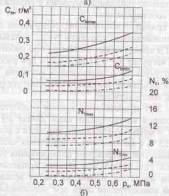
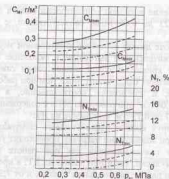


Рис. 3.18. Показатели массовой концентрации и относительного содержания сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от нагрузки: а -  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square$  — дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\blacktriangle$  — 35 % метанола в топливе

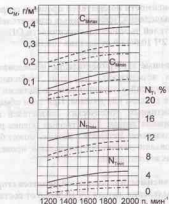


Рис. 3.19. Показатели массовой концентрации и относительного содержания сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от частоты вращения:  $\square$  — дизельный процесс;  $\circ$  — 20 % метанола в топливе;  $\blacktriangle$  — 35 % метанола в топливе

Относительное содержание сажи при работе дизеля на метано-топливной эмульсии выше, чем при работе на дизельном топливе во всем диапазоне изменения частот вращения, причем при работе дизеля на ДТ и МТЭ с увеличением частоты вращения относительное содержание сажи увеличивается. При  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  относительное содержание сажи составляет 11,5 % при работе на ДТ и 7,4 % при работе на метано-топливной эмульсии с содержанием метанола 35 %, а при частоте вращения, равной  $2000 \text{ мин}^{-1}$ , составляет 13,8 % и 9,6 %, соответственно.

### 3.5 Зависимости показателей процесса сгорания, тепловыделения, эффективных показателей, показателей дымности и токсичности ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива

Проведенные экспериментальные исследования убедительно доказали возможность получения стабильных метанолю-топливных эмульсий с улучшенными свойствами и применения их в качестве топлива для дизелей. При этом обнаружено постоянное эффективных, токсических показателей и показателей процесса сгорания дизеля. Качественная оценка разработанного метода использования метанола в дизелях может быть осуществлена на основании обобщения результатов проведенных экспериментальных исследований.

#### 3.5.1 Зависимости показателей процесса сгорания и тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива

На рисунке 3.20,а приведены показатели процесса сгорания дизеля в зависимости от количества метанола в топливе. Как видно из графика, увеличение количества метанола в топливе изменяет динамику процесса сгорания. Так, период задержки воспламенения увеличивается с 22,7 градусов п.к.в. до 31 градуса п.к.в. при частоте вращения коленчатого вала  $1400 \text{ мин}^{-1}$  и с 24,2 градусов п.к.в. до 32 градусов п.к.в. при  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

Максимальная скорость нарастания давления растет с  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,461 \text{ МПа/градус}$  для чисто дизельного процесса до  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,634 \text{ МПа/градус}$  при 35 % метанола в метанолю-топливной эмульсии для режима работы  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ . Эта тенденция сохраняется и на других режимах работы. Значение максимального давления сгорания при работе на дизельном топливе  $P_{21800} = 7,571 \text{ МПа}$ ,  $P_{21400} = 7,80 \text{ МПа}$ , а при работе дизеля с добавкой метанола 35 %  $P_{21800} = 7,866 \text{ МПа}$ ,  $P_{21400} = 8,010 \text{ МПа}$  [139, 142, 143, 148, 149, 152].

Применение топлива с добавкой спирта снижает также значения максимальной осредненной температуры цикла.

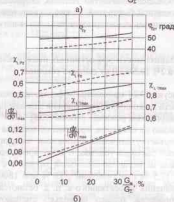
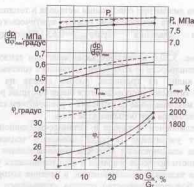


Рис. 3.20. Показатели процесса сгорания и тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от количества метанола в топливе при  $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ : а — показатели процесса сгорания; б — характеристики тепловыделения;  $\square$  —  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\circ$  —  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$

Работа дизеля при содержании метанола в топливе не должна превышать на номинальном режиме критического значения нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,63$  МПа/градус [102, 133...135].

На рис. 3.20,б приведены характеристики тепловыделения дизеля в зависимости от количества метанола в топливе.

Как видно из графиков, работа дизеля на метанолю-топливной эмульсии сопровождается более быстрым ростом температуры, максимальные ее значения с увеличением спирта в топливе достигаются при большем угле п.к.в.

С увеличением метанола в метанолю-топливной эмульсии происходит увеличение скорости активного тепловыделения. Увеличение максимальной скорости тепловыделения объясняет рост жесткости процесса сгорания и обуславливается увеличением периода задержки воспламенения, в течение которого впрыскивается большее количество топлива, сгорающего впоследствии с повышенной быстротой. Также с увеличением метанола в топливе увеличиваются выделение теплоты и активное тепловыделение.

### 3.5.2 Зависимости эффективных показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива

На рисунке 3.21 приведены эффективные показатели дизеля в зависимости от количества метанола в топливе при  $p_c = 0,6$  МПа и разных скоростных режимах работы [138].

Как видно из графиков, применение топлива с добавкой метанола вызывает увеличение суммарных часового и удельного эффективного расходов топлива. В то же время экономия ДТ при работе дизеля на метанолю-топливной эмульсии с 35 % метанола составляет 17,5 % при  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , 19 % при  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Максимальные значения эффективного к. п. д. остаются на уровне дизельного процесса, однако несколько смещаются в сторону меньших нагрузок, соответствующая минимуму  $q_e$ . Работа дизеля на спиртосодержащем топливе сопровождается также снижением температуры ОГ на 30...40 градусов из-за уменьшения температуры цикла.

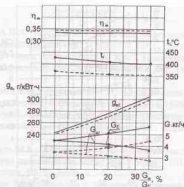


Рис. 3.21. Эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от количества метанола в топливе при  $p_c = p_{c \text{ ном}}$ :  $\square$  —  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square$  —  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$

Таким образом, работа дизеля на топливе с добавкой метанола отличается улучшением его эффективных показателей в сравнении с дизельным процессом.

### 3.5.3 Зависимости показателей дымности и токсичности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива

На рисунке 3.22 представлены кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от количества метанола в топливе при  $p_c = 0,6$  МПа и разных частотах вращения.

Анализ данных показывает, что применение метанолю-топливной эмульсии позволяет снизить эмиссию сажи в ОГ на 29...51 % при  $1400 \text{ мин}^{-1}$ , на 19...55 % при  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ также уменьшается на 62... 67 % при  $n=1400 \text{ мин}^{-1}$  и на 23...57 % при  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

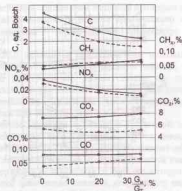


Рис. 3.22. Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от количества метанола в топливе при  $p_c = 0,59$  МПа:  $\square$  —  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>;  $\circ$  —  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>

Эмиссия CO в ОГ дизеля при его работе на эмульсии несколько увеличивается при 1400 мин<sup>-1</sup>, а при  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup> содержание CO остается на уровне дизельного процесса. Содержание других компонентов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>x</sub>) в ОГ изменяется неоднозначно: в отдельных случаях несколько увеличивается, в других же режимах работы дизеля уменьшается или остается на уровне дизельного процесса. Однако следует помнить, что они не относятся к разряду высокотоксичных соединений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1981. - 159 с.
2. Зеленая книга России: Часть II. Кн. 2. Национальная экологическая программа Российской Федерации. - М.: Универсум, 1994. - 84 с.
3. Гетманец Г.В., Лиханов В.А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта. - М.: Аспол, 1993. - 340 с.
4. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности авто-тракторных дизелей. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Колос, 1994. - 224 с.
5. Селимов М.К., Абросимов А.А. Эколого-экономические аспекты развития производства моторных топлив в США. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. - 64 с.
6. Давидов А.М. Присадки и добавки. Улучшение экологических характеристик нефтяных топлив. - М.: Химия, 1996. - 232 с.
7. Oil & Gas j. 1995. V. 93. № 3. P. 30.
8. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Изд-во РУДН, 1998. - 214 с.
9. Худолеев В.В. Влияние антропогенного воздействия на здоровье населения и качество окружающей среды / Материалы региональной научно-практической конференции. - С - Петербург: НИИСХ СПбГУ, 2001. - С. 6-10.
10. Стабилизация экологической обстановки и использование современных видов моторного топлива: Информационно-аналитические аспекты. - М.: СЭБ Интернационал Холдинг, 2001. - 368 с.
11. Смайлс В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения // Двигателестроение. - 1991. № 1. - С. 3-6.
12. Смайлс В.И. Малотоксичные двигатели. - Л.: Машиностроение, 1972. - 186 с.
13. Перспективы применения оксигенатных биотоплив из возобновляемых источников сырья / В.С. Шлак, О.И. Шаповалов, В.Б. Исаков, Ю.И. Карташов и др. // Новые топлива с присадками

// Сб. тр. II международ. науч.-практ. конф. – С-Петербург: Академия прикладных исследований. – 2002. – С. 233-249.

14. Angelica Hull, Татьяна Миранджева. Перспективное дизельное топливо из возобновляемого сырья / Новые топлива с присадками // Сб. тр. II международ. науч.-практ. конф. – С-Петербург: Академия прикладных исследований. – 2002. – С. 250-259.

15. ГОСТ Р ИСО 8178-7-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 15 с.

16. ГОСТ Р 17.2.2.06-99. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения содержания оксида углерода и углеводородов в отработавших газах газобаллонных автомобилей. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 15 с.

17. 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.

18. ГОСТ 17.2.1.03-84. Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 11 с.

19. ГОСТ 17.2.2.02-98 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 11 с.

20. 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.

21. ГОСТ 17.2.2.05-97. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами тракторных и комбайновых дизелей. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 13 с.

22. ГОСТ 21393-75. Автомобили с дизелями. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений. Требования безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 5 с.

23. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. – 2002. – № 3. – С. 32-34.

24. Филиппович Т.Р., Кратко А.П. Пути снижения дымности и токсичности отработавших газов дизельных двигателей. – М.: НИИНавтопром, 1973. – 72 с.

25. 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.

26. Токсичность автотракторных двигателей и способы ее снижения / Н.П. Самойлов и др. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1997. – 170 с.

27. Лиханов В.А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения метанола. – Киров: Вятская ГСХА, 2001. – 212 с.

28. Возможности сокращения выброса окислов азота с отработавшими газами быстрого форсированного дизеля при сохранении высокой топливной экономичности / Б.Н. Семенов, В.И. Смэйлис, В.Ю. Быков и др. // Двигателестроение. – 1986. – № 9. – С. 3-6.

29. Ведрученко В.Р. Перспективы развития и использования топливных ресурсов для транспортной и судовой энергетики // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 20-22.

30. Софов В.А. Проблемы экономии топлива на водном транспорте. – Л.: Судостроение, 1983. – 96 с.

31. Маслов В.В., Большаков В.Ф., Карпов Л.Н. Направления развития судов энергетики // Морской флот. – 1981. – № 9. – С. 44-46.

32. Ведрученко В.Р. Топливоиспользование в тепловозных дизелях. Системные методы исследования. – Омск: ОмИИТ, 1990. – 89 с.

33. Терезгъев Г.А., Тюков В.М., Смьль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. – М.: Химия, 1989. – 272 с.

34. Селиверстов В.М., Браславский М.И. Экономия топлива на речном флоте. – М.: Транспорт, 1989. – 231 с.

35. Боксерман Ю.И., Мкртычан Д.С., Чириков Н.Ю. Перевод транспорта на газовое топливо. – М.: Недра, 1988. – 224 с.

36. Ерофеев В.П. Использование перспективных топлив в судовых энергетических установках. - Л.: Судостроение, 1989. - 80 с.

37. Скотт У.М. Новые виды топлива для автомобильных дизелей // Перспективные автомобильные топлива: Пер. с англ. - М.: Транспорт, 1982. - С. 223-248.

38. Смаль Ф.В., Арсенов Е.Е. Перспективные топлива для автомобилей. - М.: Транспорт, 1979. - 151 с.

39. Экономия горючего. // Под. Ред. Е.П. Серегина.- М.: Воениздат, 1980. - 144 с.

40. Обелицкий А.М. Топливо и смазочные материалы. - М.: Высшая школа, 1982. - 208 с.

41. Alcohols in diesel engines a review: "Automot. Eng." 1984, V/92, № 6, p. 40-44.

42. Возможности расширения ресурса дизельных топлив с применением легких синтетических углеводородов в качестве добавки / В.П. Шкаликова и др. // Двигателестроение. - 1986. - № 12. - С. 26-29.

43. Лерман Е.Ю., Гладков О.А. Высококонцентрированные водо-топливные эмульсии - эффективное средство улучшения экологических показателей легких быстроходных дизелей // Двигателестроение. - 1986. - № 10. - С. 35-37.

44. Шкаликова В.П., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: Монография. - М.: Изд-во УДН, 1986. - 56 с.

45. Смаль Ф.В. Метанол - топливо для автомобилей // Автомобильный транспорт. - 1978. - № 7. - С. 41-43.

46. Ляханов В.А., Плотников С.А. Применение метано-топливных эмульсий в тракторных дизелях. - Киров: НИИХС Северо-Востока, 2000. - 96 с.

47. Коллеров Л. К. Применение пылеугольного топлива в дизелях. // Двигателестроение. - 1982. - № 2. - С. 51-53.

48. Лебедев О.Н. Некоторые особенности горения капель водо-топливных эмульсий в дизелях // Автомобильная промышленность. - 1978. - № 2. - С. 142-145.

49. Штарке К. Специальные топливные присадки для альтернативных видов топлив на основе спиртов для карбюраторных и дизельных двигателей // Симпозиум по проблемам, связанным с

производством и применением метанола в качестве моторного топлива. - М., 1982. - С. 38.

50. Лавров Ю.Г. Исследования водо-топливных эмульсий с поверхностно-активным веществом Л1-2000 / Новые топлива с присадками // Сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. - С-Петербург: Академия прикладных исследований. - 2002. - С. 139-144.

51. Стащенко В.Н., Суменков В.М., Селезнев Ю.С. Эффективность применения водотопливных эмульсий в судовых котлах. // Судостроение, 1999. - № 2. - С. 31.

52. Лютков В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. - М.: МАДИ (ТУ), 2000. - 311 с.

53. Звонов В.А., Черных В.И., Балакин В.К. Метанол как топливо для транспортных двигателей. - Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1990. - 150 с.

54. Хачиян А.С. Применение спиртов в дизелях // Двигателестроение. - 1984. - № 8. - С. 30-34.

55. May Ch., Agron M., Basiron Y.: Palm Oil Methyl Esters as Fuel; Palm Diesel. Porim Information Series. No. 17. October 1993.

56. Проблемы использования альтернативных видов топлива в Японии // Автомобильная промышленность США. - 1997. - № 7. - С. 5.

57. Timothy T. Maxwell, Jesse C. Jones: Alternative Fuels. Society of Automotive Engineers, USA 1995.

58. Weideman K., Heinrich H.: Einsatz von Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im VW/ Audi Dieselmotor. VDI Berichte 1020. Düsseldorf Germany 1992.

59. Перспективные автомобильные топлива / Пер. с англ. - Под ред. Я.Б. Чертова. - М.: Транспорт, 1986. - 319 с.

60. Вишпер А.Б., Абрамов С.А., Балакин В.И. Использование тяжелых нефтяных и альтернативных топлив в дизелях // Двигателестроение. - 1984. - № 7. - С. 32-34.

61. Heinrich Gerd, Prescher Karlheinz, Finsterwalder Gerhard. Wasser und Methanolzusätze bei dieselmotorischer Verbrennung // MTZ - 1984.-№5.-S. 183-188.



62. Терентьев А.Г., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. - М.: Химия, 1989. - 272 с.

63. Горение и течение в агрегатах энергоустановок. Моделирование, энергетика, экология. / В.Г. Крюков, В.Н. Наумов, А.В. Демин, А.Л. Абдулин, Т.В. Тринос. - М.: Янус - К, 1997. - 304 с.

64. Плотников С.А., Лунева В.В. Создание и применение стабильных метано-топливных эмульсий в качестве топлива для дизелей // Двигателестроение. -1990. -№ 10. -С. 29-31.

65. Бодотов А.К., Плотников С.А. Использование метано-топливной эмульсии в дизелях // Диагностика, повышение эффективности и долговечности двигателей: Тез. докл. Всесоюз. семинара. - Ленинград-Пушкин, 1990. -С. 4-5.

66. Дружинин П.В., Дыбок В.В. Применение присадок к топливу самый эффективный способ улучшения экологических и технико-экономических показателей транспортных дизелей / Новые топлива с присадками // Сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. - С-Петербург: Академия прикладных исследований. - 2002. - С. 217-223.

67. Малов Р.В., Ю В.К., Ксенофонтов И.В. Некоторые особенности применения метанола в дизелях // Двигателестроение. - 1989. -№8. -С. 30-31.

68. Малов Р.В., Ксенофонтов И.В. Кинетика воспламенения и горения бинарных спиртовых топлив в дизелях // Двигателестроение. -1986. -№ 3. -С. 55-57.

69. Гупало Ю.П., Полянин А.Д., Рязанцев Ю.С. Массотеплообмен реагирующих частиц с потоком. -М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. - 336 с.

70. Луканин В.Н., Махов В.З., Вильявичюс Г.П. Особенности воспламенения струи метанола в поджигаемой метано-воздушной смеси // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 132-133.

71. Алексеев Д.К. Особенности процесса сгорания при использовании метанола в дизеле с комбинированным смесеобразованием // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С. 134.

72. Малов Р.В., Ксенофонтов И.В., Ю.В.К. Воспламенение и горение метано-углеводородных смесей // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С.135.

73. Малов Р.В., Ксенофонтов И.В., Ляхачев В.М. Работа четырехтактных дизелей на топливе с присадкой метанола // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Киров, 1988. -С.136.

74. Давылов А.М., Митусова Т.Н., Микутенко Ю.А. Присадки к дизельным топливам в России // Двигателестроение. - 2000. - № 1. - С. 21-22.

75. Давылов А.М. О совместимости присадок к топливам // Химия и технология топлив и масел. - 1998. - № 5. - С.14-15.

76. Абрамов С.А., Гладких В.А., Попов В.П. О работах в ФРГ по применению метанола в качестве моторного топлива // Двигателестроение. - 1983. - № 8. - С. 55-57.

77. Masahiko Hori. Performanse and Emissions in Alcohol Diesel Engines // Tidoshia gijutsu, T. soc. Automot. Eng. Tap. - 1979. -3. - № 9. - p. 769-774.

78. Лиханов В.А., Плотников С.А. Исследование мощностных и экономических показателей работы дизеля на метано-топливных эмульсиях // Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла: Тез. докл. Всесоюз. семинара. -Новосибирск, 1990. -С. 11.

79. Лиханов В.А., Плотников С.А. Применение метано-топливной эмульсии для снижения токсичности отработавших газов дизеля // Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла: Тез. докл. Всесоюз. семинара. - Новосибирск, 1990. -С. 12.

80. Antonini A., Giadrossi A., Annovi E. Metanol in Alternativ - Mischkraftstoffen für Dieselmotoren. MTZ, -1983. - 44. - № 1. - S. 27-30.

81. Лебедев С.Р., Чечкенов Я.Д. Химотологические проблемы применения в отечественных топливах присадок различного функционального назначения / Новые топлива с присадками // Сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. - С-Петербург: Академия прикладных исследований. - 2002. - С. 157-158.

82. Исследование антидетонационных характеристик кислородосодержащих соединений / М.А. Танатаров, Е.А. Кантор, Х.Н. Зайнуллин, А.Т. Гильмутдинов // Химия и технология топлив и масел. - 1983. - № 12. - С. 16-17.

83. Лиханов В.А., Плотников С.А. Создание стабильных метанолю-топливных эмульсий // Научно-технический прогресс в химмотологии топлив и смазочных материалов: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Днепрпетровск, 1990. - С. 28.

84. Лернер М.О. Химические регуляторы горения моторных топлив. - М.: Химия, 1979. - 224 с.

85. Болотов А.К., Плотников С.А. Влияние присадок на стабильность метанолю-топливных эмульсий. - М.: ЦНИИТЭИ-тракторсельхозмаш, 1989. - № 7. - С. 130.

86. Отборочные испытания моторных двигателей, работающих на метаноле // Экспресс-информ. Поршневые и газотурбинные двигатели. - М.: ВИНТИ, 1984. - № 21. - С. 6-8.

87. 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.

88. А.с. СССР № 842210, МКИ<sup>1</sup> 02 M 55/00. Система подачи топлива в дизель. // Открытия. Изобретения. - 1978.

89. Патент ФРГ № 3002851, 02 M 67/14. Система впрыска спиртового и запального дизельного топлив. // Открытия. Изобретения. - 1981.

90. Lawson A., Last A.J. - SAE Techn. Pap. Ser., 1979. № 790925. - P.11.

91. Новиков Л.А., Борещкий Б.М., Вольская Н.А. Механизм влияния состава водотопливных эмульсий на смесеобразование в дизелях с неразделенными открытыми камерами сгорания // Двигателестроение. - 1996. - № 1. - С. 35-40.

92. Гладков О.А., Берштейн Е.В., Виноградов Д.П. Характер воздействия водотопливной эмульсии на процессы сгорания топлива в дизеле // Двигателестроение. - 1989. - № 10. - С. 35-40.

93. Ипанов В.М. Топливные эмульсии. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 301 с.

94. Ипанов В.М., Канторович Б.В. Топливные эмульсии и суспензии. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 182 с.

95. Малов Р.В., Пекцев В.В. Эмульгирование топлива и экологические характеристики дизеля // Автомобильная промышленность. - 1992. - № 8. - С. 15-18.

96. Малов Р.В. Механизм воспламенения низкоцетановых дизельных топлив // Автомобильная промышленность. - 1994. - № 10. - С. 11-14.

97. Яковлев А.В. и др. Воспламеняемость обратных топливных эмульсий // Химия и технология топлив и масел. - 1984. - № 12. - С. 15-17.

98. Влияние оксигенатных добавок к дизельному топливу на энергоэкологические характеристики двигателя / В.Н. Скобелев, В.А. Мельников, А.А. Кудяк, Д.В. Сердюк, Л.А. Ашхизази // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей / Материалы IX Междунар. науч. - практ. конф. Владим. гос. ун-т. - Владимир, 2003. - С. 218 - 221.

99. Камфер Г.М. Комплексный показатель смесеобразования для дизелей с камерой в поршне // Двигателестроение. - 1986. - № 4. - С. 3-6.

100. Камфер Г.М. Сравнительный анализ процесса испарения в дизелях с различными способами смесеобразования // Двигателестроение. - 1985. - № 8. - С. 3-7.

101. Камфер Г.М., Семенов В.Н. Некоторые особенности рабочего цикла дизеля с камерой сгорания в поршне при использовании смесей дизельного топлива с бензином // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. - Москва, 1985. - С. 20-24.

102. Эфрос В.В. и др. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода. - М.: Машиностроение, 1976. - 277 с.

103. Тырычев А.Г. Снижение шумности и токсичности транспортных дизелей: Аналитический обзор. - М.: ВНИИЦ, 1999. - 40 с.

104. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. - М.: Наука, 1978. - 368 с.

105. Чистяков Б.Е., Беденко В.Г. Основные предпосылки создания стабильных водно-топливных эмульсий // Химия и технология топлив и масел. - 1982. - № 3. - С. 22-23.

106. Левченко Д.Н. и др. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. – М.: Химия, 1968. – 200 с.
107. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.
108. Абрамзон А.А., Бочаров В.В. и др. Поверхностно-активные вещества: Справочник. – Л.: Химия, 1979. – 376 с.
109. Азев В.С., Лулева В.В., Герасимова Г.Н. Создание стабильных смесей дизельного топлива с метанолом // Химия и технология топлив и масел. – 1985. – № 11. – С. 13-15.
110. Эмульсии. Под ред. Ф. Шермана. – М.: Химия, 1972. – С. 75-122.
111. Малов Р.В. к вопросу о механизме внутрикамерного распыливания эмульсий // Двигателестроение. – 1991. – № 4. – С. 12-13.
112. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
113. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. – М.: Машиностроение, 1964. – 305 с.
114. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1988. – 503 с.
115. Иванов В.Н., Радовичский И.В., Целев В.А. О механизме сгорания дисперсных топливных систем // Химия и технология топлив и масел. – 1985. – № 6. – С. 18-20.
116. Споддинг Д.Б. Горение и массообмен. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
117. Гуреев А.А., Камфер Г.М. Испаряемость топлив для поршневых двигателей. – М.: Химия, 1982. – 264 с.
118. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. – Харьков: Высшая школа, 1980. – 169 с.
119. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. – 616 с.
120. Kamimoto Takayuki, Osako Shuichi, Matsuoka Shin. «Air cells» combustion chamber reduced diesel soot. «Automot. Eng.», 1983. – №9. – С. 51 – 52.
121. Плотников С.А. Calculated and experimental estimation of inflammability of alcohol fuel blends. // VIII International Sym-

- sium ecological aspects of mechanisation of plant production. Warszawa: 2001. – P. 196-205.
122. О механизме действия присадки к дизельному топливу «0010» / В.Н. Скобелев, В.А. Медных, Д.Ю. Агафонов, Д.В. Сердюк, Л.А. Ашихина // Новые топлива с присадками / Сб. тр. II междунард. науч.-практ. конф. – С-Петербург: Академия прикладных исследований. – 2002. – С. 300-309.
123. Аднан И.Ш., Камфер Г.М., Луканин В.Н. Расчет периода задержки воспламенения в дизеле в условиях двухфазного смесобразования // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. – Москва, 1985. – С. 10-19.
124. Камфер Г.М., Болотов А.К., Плотников С.А. Расчетная оценка цетановых чисел спирто-топливных смесей // Улучшение показателей автомобилей и тракторных двигателей: Тр. МАДИ. – М., 1990. – с. 59-64.
125. Стечкин Б.С., Генкин К.И., Золоторевский В.С. Индикаторная диаграмма, динамика теплообразования и рабочий цикл быстрогоходного поршневого двигателя. М.: АН СССР, 1960. – 197 с.
126. Боярошников Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола // Физика горения и взрыва. – 1992. – № 3. – С. 26-36.
127. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. / Пер. с англ. под ред. Ю.Ф. Дитязина / – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.
128. ГОСТ – 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
129. ГОСТ Р 17.2.2.07-2000 Охрана природы. Атмосфера. Поршневые двигатели внутреннего сгорания для малогабаритных тракторов и средств малой механизации. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами и дымности отработавших газов. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 16 с.
130. Разработка стабилизаторов и методов исследования эмульсий для топлив: ТЭД по теме 59 – 80, / ВНИИПАВ, Б.Е. Чистяков // № 01.80. 0024424, заяв. № 02840036397. – Шебекино, 1984. – 52 с.

131. Белявцев А.В., Процоров А.С. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 224 с.

132. Сисин В.А. Установа для приготовления водотопливной эмульсии // Речной транспорт. – 1984. – № 10. – С. 32-33.

133. Тракторы Т-25А и Т-25А1. Под ред. Эфроса В.В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Т25А.00.000.ТО., 1986. – С. 192.

134. Тракторы Т – 30 и Т – 30А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Т30.00.00.ТО. – Владимир, 1988. – 208 с.

135. Тракторные дизели: Справочник / Б.А. Взоров, А.В. Адамович, А.Г. Арабия и др.; Под общ. ред. Б.А. Взорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 585 с.

136. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам. М.: Химия, 1972. – 358 с.

137. Гушин С.Н. Новое воззрение на процесс горения метанольных эмульсий в цилиндре дизеля // Улучшение эксплуатационных показателей мобильной энергетики: Материалы 12-ой науч. – практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Киров, 2001. – С. 49 - 52.

138. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гушин С.Н. Влияние метанола-топливной эмульсии на эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 // Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары, Чебоксарский институт МГОУ, 2002. – С. 124 - 129.

139. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гушин С.Н. Анализ показателей процесса сгорания тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метанола-топливной эмульсии // Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары, Чебоксарский институт МГОУ, 2002. – С. 129 - 133.

140. Гушин С.Н. Возможные пути улучшения эксплуатационных показателей дизеля при работе с использованием метанола // Проблемы механизации и сервисного обслуживания технологического оборудования в сельскохозяйственном производстве: Сб. науч. тр. Вятской ГСХА. – Киров, 2002. – С. 91 - 95.

141. Плотников С.А., Гушин С.Н. Разработка эффективных спиртовых топлив // Здоровье – Питание – Биологические ресурсы: Международ. науч. – практ. конф.: В 2 т. – Киров, НИИСХ Северо-Востока, 2002. – Т.2. – С. 252-258.

142. Гушин С.Н. Влияние спиртосодержащих топлив с присадками целенаправленного действия на процесс сгорания // Наука нового века - знания молодых: Тез. докл. 2-ой городской науч. конф. аспирантов и соискателей. – Киров: Вятская ГСХА, 2002. – С. 120-121.

143. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гушин С.Н. Исследование показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 на метанола-топливных эмульсиях с присадками целенаправленного действия // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С-Петербург – Киров: Российская Академия Транспорта, Вятская ГСХА, 2003. – С. 81 - 86.

144. Гушин С.Н. Исследование влияния присадок на стабильность метанола-топливных эмульсий // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С-Петербург – Киров: Российская Академия Транспорта, Вятская ГСХА, 2003. – С. 76 - 80.

145. Plotnikov Sergej, Guschin Sergej. Improvement of properties alcohol contained of combustibles by application of dopes of targeted operation // IX International Symposium ecological aspects of mechanisation of plant production - Warshava, 2002. – P. 298-304.

146. Создание новых видов спиртосодержащих топлив / В.А. Лиханов, С.А. Плотников, С.Н. Гушин, В.В. Лулева // Новые топлива с присадками: Сб. тр. II Международ. науч.-практ. конф. – С - Петербург: Академия прикладных исследований, 2002. – С. 367а-367л.

147. Исследование работы дизеля на спиртосодержащих топливах / В.А. Лиханов, С.А. Плотников, С.Н. Гушин, В.В. Лулева // Новые топлива с присадками: Сб. тр. II Международ. науч.-практ. конф. – С - Петербург: Академия прикладных исследований, 2002. – С. 367а-367л.

148. Плотников С.А., Гушин С.Н., Лебедев С.Р. Исследование показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 на спиртосодержащих топливах с присадками целенаправленного действия // Дви-

гателестроение. – 2003. -№1. - С. 36-37.

149. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гуцин С.Н. Исследование процесса сгорания тракторного дизеля 24 10,5/12,0 при работе с добавкой метанола // Улучшение технико-эксплуатационных показателей мобильной техники: Материалы 13-ой науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Н. Новгород, НГСХА, 2003. – С. 96-99.

150. Плотников С.А., Гуцин С.Н., Лулева В.В. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива на показатели процесса сгорания и тепловыделения тракторного дизеля 24 10,5/12,0 // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы IX Междунар. науч. – практ. конф., Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2003. – С. 157 – 160.

151. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гуцин С.Н. Влияние присадок на стабильность метано-топливных эмульсий // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. Тр. Международ. науч.–техн. конф. – С – Петербург, 2003. – С. 235-237.

152. Plotnikov Sergej, Guschin Sergej. Effect of alcohol-containing fuel composition on combustion indices. // X International Symposium ecological aspects of mechanisation of plant production. - Warshava, 2003. – P. 186-191.

153. Лиханов В.А., Плотников С.А., Гуцин С.Н. Влияние состава метано-топливной эмульсии на показатели дымности и токсичности отработавших газов дизеля 24 10,5/12,0 // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С-Петербург – Киров: Российская Академия Транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - С. 62 - 66.

154. Гуцин С.Н. Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 24 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки и частоты вращения // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: сб. науч. тр. – С-Петербург – Киров: Российская Академия Транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - С. 39 - 43.

155. Патент №2221839 RU, МПК 7 C10L 1/32: Топливная эмульсия // В.А. Лиханов, С.А. Плотников, В.В. Лулева, С.Н. Гуцин - №2002128568/04; Опубл. 20.01.04; Бюл. №2.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	стр.
И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
<b>1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	7
1.1 Социально – экологические аспекты влияния автотракторных двигателей на окружающую среду	7
1.2 Применение эмульсий в дизелях в качестве моторного топлива	10
1.3 Влияние топливных эмульсий на процессы впрыскивания, распыливания, смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля	17
1.3.1 Влияние топливных эмульсий на процессы впрыскивания, распыливания и смесеобразование в цилиндре дизеля	17
1.3.2 Влияние топливных эмульсий на процесс сгорания в дизелях	20
<b>2 ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИСАДОК НА ПРОМОТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ</b>	24
2.1 Воздействие присадок на промотирование процесса воспламенения метано-топливной эмульсии в цилиндре дизеля	24
2.2 Влияние состава метано-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля	46
<b>3 УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ 24 10,5/12,0 ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ</b>	54
3.1 Результаты исследований свойств метано-топливных эмульсий с присадками целенаправленного действия	54
3.2 Результаты исследований работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и метано-топливной эмульсии	61

3.3	Результаты исследований влияния состава метано-топливной эмульсии на рабочий процесс, эффективные и токсические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0	64
3.3.1	Определение оптимальных регулировок системы топливоподачи при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на метано-топливной эмульсии	64
3.3.2	Влияние состава метано-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0	69
3.3.3	Влияние состава метано-топливной эмульсии на эффективные показатели работы дизеля 2Ч 10,5/12,0	80
3.3.4	Влияние состава метано-топливной эмульсии на показатели дымности и токсичности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0	85
3.4	Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0	90
3.4.1	Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от угла поворота коленчатого вала	90
3.4.2	Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива	93
3.4.3	Определение относительного содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала	95
3.5	Зависимости показателей процесса сгорания, тепловыделения, эффективных показателей, показателей дымности и токсичности ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива	100
3.5.1	Зависимости показателей процессов сгорания и тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива	100
3.5.2	Зависимости эффективных показателей работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива	102
3.5.3	Зависимости показателей дымности и токсичности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 от состава топлива	103
ЛИТЕРАТУРА		105

Научное издание

Лиханов Виталий Анатольевич  
Гушкин Сергей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ 2Ч 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ  
НА МЕТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**

Монография

Редактор А.В. Зверева

Заказ №24. Подписано к печати 15.02.06 г.  
Формат 60x84/16. Объем 6,6 усл. печ. л. 7. Тираж 500 экз.  
Бумага офсетная. Цена договорная. Отпечатано с оригинал – макета.  
Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО «Вятская ГСХА»  
610017, г. Киров, Октябрьский проспект, 133