

**Министерство сельского хозяйства РФ  
ФГОУ ВПО «Вятская государственная  
сельскохозяйственная академия»**

**В.А. ЛИХАНОВ, А.А. ЛОПАРЕВ,  
В.Г. МОХНАТКИН, А.В. РОССОХИН,  
Л.В. РУДАКОВ, М.А. ОЛЕЙНИК**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ  
ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРЕ  
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ  
4СН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ  
НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

**Киров 2007**

Министерство сельского хозяйства РФ  
ФГОУ ВПО «Вятская государственная  
сельскохозяйственная академия»

**В.А. ЛИХАНОВ, А.А. ЛОПАРЕВ,  
В.Г. МОХНАТКИН, А.В. РОССОХИН,  
Л.В. РУДАКОВ, М.А. ОЛЕЙНИК**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ  
ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРЕ  
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ  
4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ  
НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

**Монография**

**КИРОВ 2007**

Лиханов В.А., Лопарев А.А., Мохнаткин В.Г., Россохин А.В., Рудиков Л.В., Олейник М.А. Исследование рабочих процессов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе. Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2007 - 288 с.

**Рецензенты:** А.П. Акимов – директор Чебоксарского института (филиала) Московского государственного открытого университета, заведующий кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства, доктор технических наук, профессор;  
Л.А. Жолобов – заведующий кафедрой тракторов и автомобилей ФГОУ ВПО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», кандидат технических наук, профессор.

Монография под редакцией академика Российской Академии транспорта доктора технических наук, профессора В.А. Лиханова посвящена вопросам исследования рабочих процессов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе, снижению токсичности и дымности отработавших газов.

В монографии рассмотрены вопросы применения сжатого природного газа в качестве моторного топлива для автомобильного дизеля Д-245.12С с целью замены традиционного дизельного топлива и снижения токсичности и дымности отработавших газов. Особое внимание уделено исследованию работы дизеля на природном газе, его влиянию на процессы сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные и индикаторные показатели, токсичность и дымность отработавших газов. Отдельно рассмотрены и проанализированы механизмы образования оксидов азота и сажи в цилиндре дизеля при работе на природном газе и предложены мероприятия по снижению их эмиссии с отработавшими газами.

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

© Лиханов В.А., Лопарев А.А., Мохнаткин В.Г., Россохин А.В., Рудиков Л.В., Олейник М.А., 2007

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1.  $n$  - частота вращения коленчатого вала дизеля, мин<sup>-1</sup>
2.  $N_e$  - эффективная мощность дизеля, кВт
3.  $M_k$  - крутящий момент дизеля, Н·м
4.  $G_a$  - часовой расход воздуха, кг/ч
5.  $G_f$  - часовой расход топлива, кг/ч
6.  $G_{дт}$ ,  $G_{f\text{эл}}$  - часовые расходы дизельного топлива и альтернативного дизельного топлива, кг/ч
7.  $G_r$  - часовой расход природного газа, кг/ч
8.  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха
9.  $g_e$  - удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)
10.  $g_{e\text{min}}$  - минимальный удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)
11.  $\eta_v$  - коэффициент наполнения
12.  $\eta_e$  - эффективный коэффициент полезного действия
13.  $p_e$  - среднее эффективное давление, МПа
14.  $p_2$  - давление газов в цилиндре двигателя, МПа
15.  $p_{r\text{max}}$  - максимальное давление газов в цилиндре, МПа
16.  $p_c$  - давление конца сжатия, МПа
17.  $t_c$  - температура отработавших газов, °С
18.  $T$  - осредненная температура цикла в цилиндре, К
19.  $T_{\text{ср}}$  - максимальная осредненная температура шквля в цилиндре, К
20.  $\phi$  - угол поворота коленчатого вала, градус
21.  $\phi_1$  - угол поворота коленчатого вала, соответствующий периоду задержки воспламенения, градус
22.  $\phi_{12}$  - угол п.к.в., соответствующий максимальной температуре цикла, градус
23.  $\frac{dp}{d\phi}$  - скорость нарастания давления газов в цилиндре, МПа/градус
24.  $t_1$  - период задержки воспламенения
25.  $\varepsilon$  - степень сжатия
26.  $\Theta_{\text{оп}}$  - устинговый угол опережения впрыскивания топлива, градус

27.  $\chi$  - относительное тепловыделение от сгорания топлива  
 28.  $\chi_i$  - активное тепловыделение  
 29.  $\frac{dx}{d\varphi}$  - относительная скорость активного тепловыделения, 1/градус  
 30.  $\text{NO}_x$  - оксиды азота, ppm  
 31. CO - оксид углерода, %  
 32.  $\text{CO}_2$  - диоксид углерода, %  
 33. CH - суммарные углеводороды, %  
 34. C - дымность, ед. по шкале bosch  
 35. АГНКС - автомобильная газонаполнительная компрессорная станция  
 36. ВВ - вредные вещества  
 37. в.м.т. - верхняя мертвая точка  
 38. ВТАМ - высокотемпературный антидетонный механизм  
 39. ГБО - газобаллонное оборудование  
 40. ДВС - двигатель внутреннего сгорания  
 41. ДТ - дизельное топливо  
 42. ЕЭК - Европейская экономическая комиссия  
 43. КПГ - компримированный природный газ  
 44. к.п.д. - коэффициент полезного действия  
 45. КС - камера сгорания  
 46. МВВ - метановоздушный вихрь  
 47. МВС - метановоздушная смесь  
 48. н.м.т. - нижняя мертвая точка  
 49. НТФМ - низкотемпературный фенольный механизм  
 50. ОГ - отработавшие газы  
 51. ПАУ - полициклические ароматические углеводороды  
 52. ПДК - предельно допустимая концентрация  
 53. ПЖЦ - полный жизненный цикл  
 54. ПЗВ - период задержки воспламенения  
 55. п.к.в. - поворот коленчатого вала  
 56. СУГ - сжиженные углеводородные газы  
 57. ТНВД - топливный насос высокого давления  
 58. ТПА - топливоподающая аппаратура  
 59. ТЧ - твердые частицы  
 60. УОВТ - угол опережения впрыскивания топлива

61. C - массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля,  $\text{г/м}^3$   
 62.  $C_{\text{max}}$  - максимальная массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля,  $\text{г/м}^3$   
 63.  $C_{\text{max}}$  - массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля в момент открытия выпускного клапана,  $\text{г/м}^3$   
 64. г - относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля,  $\text{г/кг}$   
 65.  $g_{\text{max}}$  - максимальная относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля,  $\text{г/кг}$   
 66.  $g_{\text{max}}$  - относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля в момент открытия выпускного клапана,  $\text{г/кг}$   
 67. N - количество частиц сажи в единице объема цилиндра дизеля,  $\text{мм}^{-3}$   
 68.  $N_{\text{max}}$  - максимальное количество частиц сажи в единице объема цилиндра дизеля,  $\text{мм}^{-3}$   
 69.  $N_{\text{max}}$  - количество частиц сажи в единице объема цилиндра дизеля в момент открытия выпускного клапана,  $\text{мм}^{-3}$   
 70.  $C_{\text{NOx}}$  - массовая концентрация оксидов азота, %, ppm,  $\text{г/м}^3$   
 71.  $g_{\text{NOx}}$  - объемное содержание оксидов азота, %, ppm,  $\text{г/(кВт}\cdot\text{ч)}$

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день двигатели внутреннего сгорания являются самым распространенным типом энергетических установок, используемых на автомобилях и мобильной сельскохозяйственной технике. При этом отмечается постоянный рост доли дизельных двигателей из-за их большей экономичности по сравнению с бензиновыми. В ОГ ДВС содержится несколько сотен различных веществ, в том числе и вредных для окружающей среды и человека.

Одним из наиболее токсичных компонентов ОГ дизелей являются оксиды азота и сажа, образующиеся при сгорании топлива в дизелях. Попадая в атмосферу, сажа создает ощущение загрязненности воздуха, проникает в легкие и оседает в них, вызывая различные заболевания. Оксиды азота разрушают легочную ткань и воздействуют на ЦНС. Поэтому задача снижения содержания оксидов азота и сажи в ОГ дизелей является актуальной и на сегодняшний день далеко не решенной.

Вопросами сажеобразования в дизелях в разное время занимались Бакиров Ф.Г., Батурын С.А., Блох А.Г., Вагнер В.А., Кочурин А.Д., Лавров Н.В., Кузьмин В.А., Ложкин В.Н., Лоскутов А.С., Мальцев В.Н., Новоселов А.Л., Страдомский М.В., Таран Э.Н., Теснер П.А., Эфрос В.В., Звонов В.А., Разлейцев Н.Ф., Баранов Н.А., Кнорре В.Г., Смайлен В.И. и др.

Снижения содержания сажи в ОГ дизелей можно добиться установкой в системе выпуска ОГ сажевых фильтров, которые позволяют снизить сажеобразование в ОГ на 55...65 %, однако они имеют небольшой ресурс и достаточно дороги в производстве. Другим способом снижения содержания сажи является применение антидымных присадок к топливу, которые, по мнению некоторых исследователей, позволяют снизить сажеобразование в ОГ дизелей до 45 %. Но выпускаемые в настоящее время присадки имеют высокую стоимость и способны вызывать нагарообразование и повышенный износ деталей двигателя. К тому же в их состав также входят токсичные компоненты.

Некоторого снижения содержания сажи в ОГ дизелей можно достигнуть путем оптимизации и совершенствования рабочего процесса дизеля и внесения серьезных конструктивных измене-

ний. Однако это не позволит снизить содержание сажи в ОГ до уровня требований, действующих в странах Евросоюза и вводимых в России.

С другой стороны, все более остро ставится проблема дефицита топлива нефтяного происхождения и поиска альтернативных топлив для ДВС. Запасы нефти при существующем росте темпов их добычи могут быть исчерпаны в течение нескольких ближайших десятилетий. По самым оптимистичным прогнозам европейских специалистов разведенных запасов нефти хватит на 40 лет, после чего ее дефицит станет сильнейшим сдерживающим фактором для развития мировой экономики. Поэтому специалистами многих стран занимаются вопросами перевода дизелей на топливо ненефтяного происхождения. Самым доступным и дешевым альтернативным топливом, по мнению специалистов, в настоящее время является компримированный природный газ, который на 95...99 % состоит из метана (СН<sub>4</sub>).

Вопросами использования в качестве моторного топлива природного газа занимались такие ученые, как Геткин К.И., Долганов К.Е., Михеев В.П., Равкинд А.А., Мативский Д.Д., Макаров В.В., Варшавский И.Л. и др.

Углубленный анализ результатов научных исследований показывает, что зарубежными учеными и отечественными исследователями разработаны предельски, проведены глубокие экспериментальные работы на базе высококачественной измерительной техники по вопросу использования природного газа в ДВС. Имеются также работы по исследованию возможности использования природного газа в дизелях.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследования по применению природного газа проводились без должного учета взаимосвязи экологических и эксплуатационных показателей дизелей, практически нет работ по применению природного газа в быстходных автомобильных дизелях рабочим объемом до 5 литров с турбонаддувом и работ, посвященных вопросам образования оксидов азота и сажи в дизелях при работе на природном газе. Мало исследований, заканчивающихся созданием макетных образцов и проведением их эксплуатационных испытаний.

Значительный интерес представляет исследование показателей рабочего процесса, характеристик сгорания и тепловыделе-

ния при работе двигателя на природном газе, поскольку по своим свойствам КПГ и ДГ существенно отличаются друг от друга.

Все это дает основание предполагать, что улучшение эффективных и экологических показателей дизелей при работе на природном газе путем снижения содержания в ОГ оксидов азота и дымности ОГ является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение и включенной Правительством РФ в приоритетные направления развития автотранспортного комплекса РФ на период до 2020 г.

Кроме того, 30 марта 2002 г. Президент России В.В. Путин подписал Постановление Совета Безопасности РФ «О приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники Российской Федерации», среди которых значится экология и рациональное природопользование.

Анализ результатов научных исследований показывает, что количество вредных выбросов зависит от многих факторов: типа двигателя, его конструктивных особенностей, технического состояния, регулировок основных систем и узлов, а также многочисленных эксплуатационных факторов. Особенно это актуально при использовании альтернативных видов топлива.

Необходимо отметить, что при проведении исследований по улучшению экологических показателей дизеля недостаточно внимания уделялось содержанию оксидов азота в ОГ, хотя они являются наиболее токсичными компонентами ОГ. Также отсутствуют работы по снижению содержания оксидов азота на современных дизелях, имеющих турбонаддув и усовершенствованную систему топливоподачи. Решение этой задачи предполагает улучшение не только экологических, но и эффективных и экономических показателей. На основании этого можно предположить, что при использовании альтернативных видов топлива мы сможем не только сэкономить нефтяное топливо, но и улучшить другие показатели.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1. Проблемы влияния автомобильных двигателей на социально-экологическую обстановку

Околоземная атмосфера загрязняется газообразными, жидкими и твердыми выбросами промышленных предприятий, энергетических установок транспортных двигателей. Из общего количества ВВ, выбрасываемых в атмосферу крупных городов, большая часть приходится на автомобильный транспорт – около 60 %, промышленные предприятия выбрасывают 18 %, электростанции – 13 %, системы ТЭЦ – 6 % и другие источники – около 3 %. Следует отметить, что ВВ, выбрасываемые производственными предприятиями, концентрируются в определенной зоне, а ОГ автомобилей распространяются по всей территории населенного пункта. При этом доля автомобилей в загрязнении атмосферы углеводородами СН и оксидами азота  $\text{NO}_x$  составляет около 90 %, оксидом углерода СО около 30 %. При неблагоприятных условиях в приземных слоях атмосферы образуются ядовитые туманы, содержащие токсичные составляющие ОГ. Негативное влияние автотранспорта на окружающую среду сказывается не только в населенных пунктах, но и на территориях, непосредственно прилегающих к автодорогам, прежде всего, федерального значения. Уровень загрязнения воздуха вдоль городских автодорог России оксидом углерода СО достигает 3...5 ПДК, а оксидами азота  $\text{NO}_x$  – 15...25 ПДК. Такая же напряженная экологическая ситуация складывается и в большинстве стран Европы [107, 180, 188, 424].

На сегодняшний день мировой парк автомобилей насчитывает более 1 млрд. единиц. Большинство из них используют в качестве топлива продукты переработки нефти – бензин и ДТ, в элементарный состав которых входит углерод, водород, в значительных количествах кислород, азот и сера. Атмосферный воздух, являющийся окислителем топлив, состоит, как известно, в основном из азота (79 %) и кислорода (около 21 % об.). При идеальном сгорании стехиометрической смеси углеводородного топлива с воздухом в продуктах сгорания должны присутствовать  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . В реальных условиях ОГ содержит также продукты неполного сгорания (оксид углерода, альдегиды, ТЧ, перекисные

соединения, водород и избыточный кислород), продукты термических реакций взаимодействия азота с кислородом (оксиды азота), а также неорганические соединения тех или иных веществ, присутствующих в топливе (сернистый ангидрид, соединения свинца и т.д.) [139, 289, 285, 423, 483].

Дальнейшее развитие транспортного комплекса России значительно увеличивает негативное воздействие выбросов двигателей транспортных средств на окружающую среду и непосредственно на человека. Ежегодный рост автомобильного парка происходит в условиях существенного отставания экологических показателей отечественных АТС и применяемых моторных топлив от мирового уровня. Очевидно, что разработка транспортных средств, работающих на альтернативных видах моторного топлива несафитного происхождения, улучшение качества, эффективных и экологических показателей ДВС являются на современном этапе одними из основных задач двигателестроения в России [66, 73, 115, 116, 143, 226, 281, 282, 317, 430 и др.].

В соответствии с основными положениями Экологической доктрины Российской Федерации [317] стратегической целью государственной политики в области экологии является сохранение природных систем, поддержание их целостности и жизнеобеспечивающих функций для устойчивого развития общества, повышения качества жизни, улучшения здоровья населения и демографической ситуации, обеспечения экологической безопасности страны. Основной задачей в указанных сферах является снижение загрязнения окружающей среды выбросами и отходами, а важнейшими мероприятиями являются модернизация и развитие экологически безопасных видов транспорта, транспортных коммуникаций и топлива, переход к экологически безопасному обществу транспорту – основному виду передвижения в крупных городах [317]. Высокие темпы развития производства, увеличение количества используемой автомобильной техники, рост городов, деятельность человека, связанная с освоением природных ресурсов, развитием сельского хозяйства, строительства и других отраслей народного хозяйства страны увеличивают масштабы воздействия человека на окружающую природную среду ежегодно и требуют повышенного внимания к охране атмосферного воздуха [200].

Известно, что практически все транспортные средства загрязняют атмосферу, однако мощнейшими источниками загрязнения воздушной среды являются ДВС автомобилей и тракторов.

По оценкам специалистов, в настоящее время суммарная установленная мощность находящихся в эксплуатации транспортных двигателей составляет приблизительно 1400 млн. кВт, что в 5,5 раз превышает установленные мощности всех ТЭЦ, ГЭС и АЭС нашей страны. Автотранспорт, являясь одним из основных источников загрязнения воздуха, выделяет около 40 % всех вредных выбросов в России, что превышает аналогичный показатель развитых стран мира более чем в 1,7 раза. Автопарк нашей страны в настоящее время выбрасывает с ОГ более 12 млн. тонн ВВ в год. В целом по России около 60 % городского населения проживают в городах с высоким и очень высоким загрязнением воздуха [143]. Вследствие этого резко ухудшаются санитарные условия проживания, особенно в больших городах, увеличивается вредное воздействие ОГ на здоровье людей, усугубляется воздействие на человечество новой проблемы – «шарникового эффекта». В настоящее время проблема снижения загрязнения атмосферы приобрела международный характер и стала общей для всех стран мира. В качестве силовых установок в мире находится в эксплуатации сотни миллионов ДВС, которые потребляют для сжигания топлива более 1 млрд. тонн кислорода, выбрасывая при этом в атмосферу сотни миллионов тонн оксида углерода и десятки миллионов тонн оксидов азота и несгоревших углеводородов [200]. Как уже отмечалось, транспортный комплекс России, являясь одной из основных отраслей экономики страны, оказывает огромное внимание на экологическую обстановку, выбрасывая в атмосферу большое количество загрязняющих веществ.

В ФГУП «НАМИ» разработаны методики и программы для оценки экологической безопасности автомобилей, их агрегатов и горюче-смазочных материалов на основе концепции полного жизненного цикла (ДЖЦ) [317]. При этом материальный и энергетический балансы, а также загрязнение окружающей среды рассматриваются для каждой стадии, и самое существенное воздействие на экологию и потребление энергии происходит на время эксплуатации автотранспортного средства (рис. 1.1).

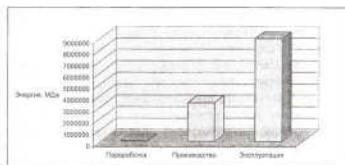


Рисунок 1.1 - Затраты энергии в ПЖЦ автомобиля

При расчете экологической безопасности по ПЖЦ, выполненному для грузового автомобиля грузоподъемностью 4500 кг при пробеге за период эксплуатации 500 тыс. км, выброс ВВ в атмосферу определяется по разработанной методике определения экономического ущерба окружающей среде на основе расчета приведенного выброса ВВ с ОГ двигателя (рис. 1.2).

Интегральная оценка влияния выбросов ВВ на окружающую среду и относительный вклад отдельных веществ во вредное воздействие на атмосферу представлены на рис. 1.3.

В европейских странах проблеме снижения токсичности ОГ двигателей начали уделять внимание еще в 80-х годах прошедшего столетия. Так, с 1982 г., когда впервые в Европе стали нормировать токсичность ОГ двигателей, до 1996 г. допустимые величины вредных выбросов сократились в 2,5...3,5 раза (табл. 1.1). Практически все западные страны заблаговременно ужесточили требования к ДВС по нормам выбросов и начали производить дизельные двигатели, соответствующие современным экологическим нормам Правил ЕЭК ООН. Внедрение в нашей стране европейских экологических стандартов по уровню выбросов автомобильных двигателей связано с рядом трудностей.

В РФ на первом этапе до 2004 года предлагалось организовать выпуск автомобилей, соответствующих нормам Евро-2, Евро-3. Вместе с тем в РФ фактически все еще действуют нормы Евро-1, а большая часть продукции автозаводов выпускается по нормам Евро-0.

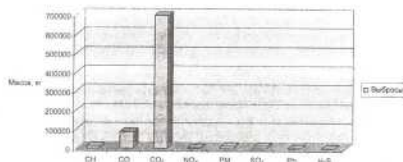


Рисунок 1.2 - Выбросы вредных веществ за ПЖЦ автомобиля

На втором этапе до 2008 года предстоит обеспечить соответствие выпускаемых автомобилей уже нормам Евро-4, что является весьма и весьма трудной задачей.

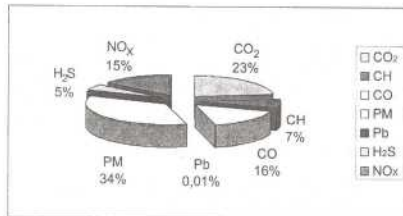


Рисунок 1.3 - Влияние различных веществ на загрязнение окружающей среды в ПЖЦ автомобиля

Автомобильный парк России насчитывает сегодня более 27 млн. автотранспортных средств и растет темпами по 3...4 процента в год [153].



По прогнозам специалистов Минтранса России [153] парк автомобильной техники может возрасти к 2010 г. до 36...39 млн. шт. При этом постоянно увеличивается и доля автомобилей с дизельными двигателями. К 2010 г. она может достичь 30 % от общего количества автомобилей.

Социально-экологические проблемы использования автотранспортных средств заключаются в том, что автомобильный транспорт является одним из крупнейших загрязнителей окружающей среды и потребителем нефтяных топлив.

Если говорить обо всех техногенных источниках загрязнений атмосферы в России в целом, то доля автотранспорта в суммарных выбросах загрязняющих веществ составляет в среднем 45 %, а в крупных городах – до 80...90 % [271]. Наряду с загрязнением воздуха исследователями отмечается рост загрязнения земель и вод отходами от автотранспортной деятельности, а также увеличение шумового воздействия на окружающую среду. Кроме того, автомобильный транспорт является одним из главных потребителей невозобновимых топливно-энергетических ресурсов [200].

По самым осторожным оценкам, величина ежегодного экологического ущерба от функционирования автотранспортного комплекса РФ оценивается в 4...5 млрд. долл. США. При сохранении существующих тенденций, по прогнозам специалистов, к 2010 г. этот ущерб увеличится ещё на 30...40 % [153].

Мировое сообщество уже достаточно давно осознало экологическую угрозу, которую несет автомобиль. Развитые страны и на национальном, и на международном уровне принимают ряд системных мер, направленных на решение экологических проблем автотранспорта.

В развитых странах сложилась тенденция устойчивого снижения общего объема вредных выбросов даже в условиях постоянного роста объема перевозок и пробега автомобилей. В большинстве стран Европы абсолютные объемы вредных выбросов от автотранспорта сократились за последнее десятилетие на 70...90 % [153]. Сейчас проблему вредных выбросов автотранспорта в Западной Европе можно считать в значительной степени решенной. В то же время форсируются разработки, направленные на применение альтернативных видов топлива на автомобильном

транспорте, и это уже попытка решить проблему истощения мировых запасов нефти.

По прогнозам специалистов при существующем росте темпов добычи природных энергоносителей запасов нефти в мире, особенно в странах Евросоюза, хватит на очень непродолжительный период. Поэтому поиск альтернативных топлив для автотранспорта является актуальным направлением научных исследований на сегодняшний день практически во всех промышленно развитых странах мира. Самым перспективным топливом в ближайшем будущем специалисты называют природный газ, запасы которого превышают запасы нефти в несколько раз (см. рис. 1.4) [222].

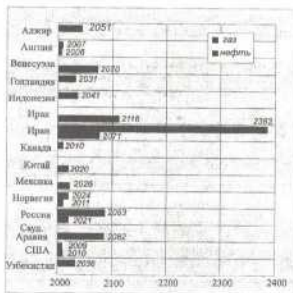


Рисунок 1.4 - Разведанные запасы нефти и природного газа на 01.01.2006 г. в отдельных странах мира

Более того, дефицит нефти и нефтяных топлив ощущается уже сегодня во многих странах мира. По данным Международного энергетического агентства уровень автомобилизации, потреб-

ность в нефти и ее добыча в последние годы неуклонно возрастают. Если на сегодняшний день уровень автомобилизации в мире составляет 122 автомобиля на 1000 человек (рис.1.5), то к 2025 году по прогнозу ожидается уже 150 автомобилей. Серьезно отличаются друг от друга объемы потребности и добычи нефти в мире. Так, в 2005 году мировая потребность в нефти и ее добыча по прогнозам специалистов составляла 85 и 81 млн. баррелей в день соответственно [195].

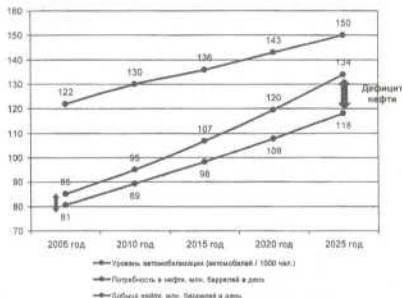


Рисунок 1.5 - Уровень автомобилизации, изменение объема добычи и потребления нефти в мире

То есть уже сейчас дефицит нефти составляет 4 млн. баррелей в день. К 2025 году (по прогнозам ОПЕК) мировая потребность в нефти и ее добыча составит уже 134 и 118 млн. баррелей в день соответственно, а дефицит нефти возрастет до 16 млн. баррелей в день [195].

В европейских странах регулярно ужесточаются нормы эко-

логических стандартов по уровню выбросов автомобильных двигателей (см. табл. 1.1).

Россия также присоединилась к соответствующим Европейским соглашениям.

Таблица 1.1 - Предельное содержание токсичных компонентов в ОГ ДВС

Нормы	Год введения	CO, г/кВт·ч	HC, г/кВт·ч	NO <sub>x</sub> , г/кВт·ч	Твердые частицы, г/кВт·ч	Дымность, м <sup>3</sup>
Евро-0	1992	12,3	2,6	15,8	-	-
Евро-1	1996	4,5	1,1	8,0	0,612	-
Евро-2	1996	4,0	1,1	7,0	0,25	-
	1998	4,0	1,1	7,0	0,15	-
Евро-3	2004	2,1	0,66	5,0	0,10	0,8
Евро-4	2005	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Евро-5	2008	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
Евро-6	-	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15

В РФ действуют федеральные целевые программы, направленные на модернизацию и снижение экологического воздействия автотранспортной системы РФ на окружающую среду: «Модернизация транспортной системы России (2002...2010 гг.)», «Экология и природные ресурсы России (2000...2010 гг.)», «Модернизация транспортной системы России (2002...2010 гг.) с подпрограммой «Автотранспортная экология» [153].

Распоряжением Правительства РФ от 24 сентября 2002 г. № 1348-р с 01 декабря 2002 г. прекращен импорт и производство в России автомобилей и автобусов с дизельными двигателями, экологические характеристики которых ниже требований Евро-1.

В рамках реализации положений Концепции развития автомобильной промышленности РФ, одобренной распоряжением Правительства РФ от 16 июня 2002 г. № 978-р и выполнением РФ обязательств, предусмотренных международным Женевским соглашением 1958 г., договаривающейся стороной которого с 1987 г. является Россия, разработан и утвержден постановлением Правительства РФ от 12 октября 2005 г. № 609 специальный технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной

техники, выпускаемой в обращение на территории РФ, вредных (загрязняющих) веществ». Специальным техническим регламентом определены сроки введения в действие требований к выбросам вредных веществ колесных транспортных средств, выпускаемых в обращение на территории РФ:

- экологического класса - 2 (Евро-2) - с даты вступления в силу настоящего технического регламента - 2006 г.;
- экологического класса - 3 (Евро-3) - с 01 января 2008 г.;
- экологического класса - 4 (Евро-4) - с 01 января 2010 г.;
- экологического класса - 5 (Евро-5) - с 01 января 2014 г.

## 1.2. Состав отработавших газов дизелей

Общая характеристика состава ОГ различных ДВС современного транспорта представлена в таблице 1.2 [211].

Таблица 1.2 - Характеристика состава ОГ двигателей

Наименование	Состав отработавших газов, %							
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (пар)	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Сажа
Бензиновые	74-77	0,3-0,8	3-5,5	5-12	5-10	До 0,8	0,2-3	До 0,4
Дизельные	76-78	2-18	0,5-4	1-10	0,02-5	До 0,5	До 0,5	До 1,1
Средний состав выбросов	75	3	5	11	5	0,15	0,5	0,35
Масса выбросов при пробеге 15000 км за 1 год	15 т	0,6 т	1 т	2,28 т	1 т	30 кг	100 кг	70кг

ОГ дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных ТЧ. Среди них можно выделить нетоксичные компоненты: азот N<sub>2</sub> и кислород O<sub>2</sub>, продукты полного сгорания топлива: CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, вещества, образующиеся в результате термического синтеза из воз-

ду при высоких температурах (оксиды азота NO<sub>x</sub>), продукты неполного сгорания топлива (CO, CH, дисперсные ТЧ, основным компонентом которых является сажа, тяжелые углеводороды), а также оксиды серы, альдегиды, продукты конденсации и полимеризации [249]. Нормируемыми токсичными компонентами ОГ дизелей в соответствии с современными нормативными документами (нормы Евро) являются NO<sub>x</sub>, CO, CH, ТЧ и дымность [76].

Оксиды азота являются одним из наиболее токсичных соединений среди всех загрязняющих веществ, содержащихся в ОГ дизелей. Они образуются в процессе горения, главным образом, как результат химических реакций атмосферного кислорода и азота. Оксиды азота, взаимодействуя с парами воды в воздухе, образуют азотную кислоту, которая разрушает легочную ткань, вызывая хронические заболевания. При хроническом отравлении наблюдаются воспалительные заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, мышечная и сердечная слабость, нервные расстройства. Поглощая естественную фоновую радиацию в ультрафиолетовых и видимых частях спектра, оксиды азота снижают прозрачность атмосферы и участвуют в образовании фотохимического тумана – смога, состоящего из фотохимических оксидантов и озона. В ОГ двигателей содержится в основном оксид NO и диоксид NO<sub>2</sub> азота [132].

Анализируя состояние вопроса загрязнения атмосферы ОГ дизелей и выделяя из большинства токсичных компонентов наиболее опасные, можно сделать вывод о необходимости снижения содержания оксидов азота. Поэтому внедрение эффективных методов по снижению этого токсичного компонента является важной научной задачей, требующей практического решения.

Другим высокотоксичным компонентом ОГ дизелей является сажа, относительная агрессивность которой принимается в ряде источников порядка 200 [54, 55, 115].

Наличие сажи в ОГ приводит к появлению неприятного ощущения загрязненности воздуха и ухудшению видимости. При вдыхании сажи ее частицы оказывают вредное воздействие на дыхательные органы человека. Они достигают легких или откладываются в трахеях и бронхах, вызывая хронические заболевания. Но основные токсические свойства сажи обусловлены не углеродом, а присутствием на ней канцерогенных полициклических

ароматических углеводородов (ПАУ), в том числе наиболее токсичного и стабильного среди них – бенз(а)пирена, имеющего химическую формулу  $C_{20}H_{12}$ , являющегося индикатором присутствия в ОГ других ПАУ. Доля бенз(а)пирена в суммарном выбросе ПАУ у дизелей составляет до 3,7 % [249]. Попадая с частицами сажи в организм человека, канцерогенные ПАУ воздействуют на процессы кровообращения, центральную нервную и мышечную системы. Обладая способностью накапливаться в организме человека до критических концентраций, канцерогенные ПАУ воздействуют на клетки организма, вызывая их мутацию и отклонения в развитии.

Таким образом, снижение дымности и содержания сажи в ОГ дизелей является актуальной задачей, имеющей важное значение для снижения суммарной токсичности ОГ дизелей и их отрицательного влияния на здоровье людей и животных.

### 1.3. Проблемы и перспективы применения природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта

С экологической точки зрения природный газ, на 95...99 % состоящий из метана  $CH_4$ , является наиболее предпочтительным топливом для ДВС по сравнению с нефтяными топливами. Содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания ДВС при работе на КПГ значительно меньше по сравнению с другими видами топлива, что видно из представленного рис. 1.6 [195].

В РФ природный газ уже давно и широко применяется в качестве моторного топлива для двигателей автомобилей с искровым зажиганием. Заправка газом осуществляется на целой сети автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС). Согласно ГОСТ 27577-2000 [77], природный газ для топлива называется компримированным природным газом (КПГ).

Учитывая отмеченные преимущества КПГ перед топливами нефтяного происхождения в РФ расширяется его использование на автотранспорте в качестве топлива. Об этом свидетельствуют объемы реализации КПГ на АГНКС в РФ (рис. 1.7).

Так, в период с 1998 по 2006 гг. объем реализованного на АГНКС природного газа увеличился в 4,5 раза.

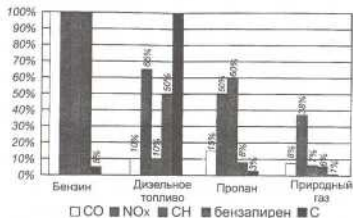


Рисунок 1.6 – Относительное содержание токсичных компонентов в отработавших газах ДВС при работе на различных топливах, % (за 100 % принят бензин, по саже 100 % – дизельное топливо)

В то же время необходимо отметить тот факт, что в бывшем СССР в 1990 г. уровень использования природного газа в качестве моторного топлива для транспорта был гораздо выше современных показателей.

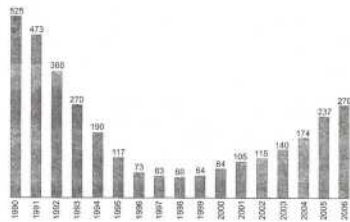


Рисунок 1.7 – Объем реализации КПГ на АГНКС России за последние 15 лет, млн м³

Так, в 1990 г. объем природного газа, реализованного на АГНКС, составил 525 млн. м<sup>3</sup>, затем потребление КПГ на автотранспорте неуклонно сокращалось и к 1998 г. составило всего 60 млн. м<sup>3</sup>, т.е. снизилось почти в 9 раз по сравнению с уровнем 1990 г. Затем ситуация стала постепенно улучшаться и к 2006 г. на АГНКС России было реализовано уже 270 млн. м<sup>3</sup> природного газа. Эта тенденция к увеличению объемов его реализации продолжает сохраняться, но все еще объем реализации природного газа на АГНКС практически вдвое ниже уровня 1990 г.

В настоящее время имеются все предпосылки для более широкого применения на российском рынке этого вида топлива. В РФ уже имеется 218 действующих АГНКС, ведется строительство новых. За рубежом КПГ уже давно и достаточно широко используется в качестве топлива для автомобилей, что видно из таблицы 1.3 (данные ОАО «Газпром» и НГА на 01.01.2006 г.).

Таблица 1.3 – Количество автомобилей, работающих на КПГ, количество АГНКС и объем реализуемого КПГ в некоторых странах

Страна	Газобаллонных автомобилей	АГНКС действующих	АГНКС строящихся	Реализация КПГ, м <sup>3</sup> /месяц
Аргентина	1457118	1452	н.д.	279236922
Бразилия	1011206	1138	120	163209000
Италия	382000	521	43	36500000
США	130000	1340	н.д.	16666667
Китай	97200	355	230	92000000
Иран	63779	96	133	20100000
Россия	47000	218	14	14416667

Согласно Концепции развития российского рынка природного газа для транспорта, утвержденной Решением Правительственной Комиссии от 3 сентября 2002 г., количество АГНКС в РФ уже к 2010 г. должно составить 400 ед., а к 2020 г. достигнуть 1122 ед (рис. 1.8).

При этом количество автомобилей, работающих на КПГ, планируется довести до 480 тыс. ед. к 2015 г. и до 1 млн. ед. к 2020 г., при том, что на сегодняшний день их количество составляет около 45...47 тыс. (рис. 1.9).

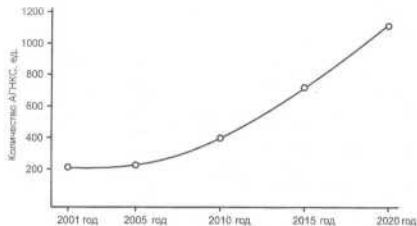


Рисунок 1.8 – Количество АГНКС в РФ согласно Концепции развития рынка ПГ для автотранспорта

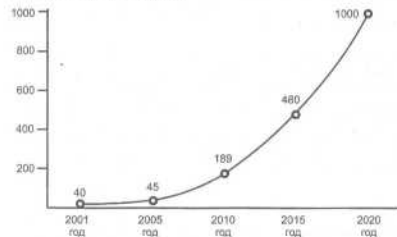


Рисунок 1.9 – Количество автомобилей, работающих на КПГ в РФ согласно Концепции развития российского рынка природного газа для транспорта

Кроме этого, КПГ является одним из самых дешевых моторных топлив на сегодняшний день (рис. 1.10).

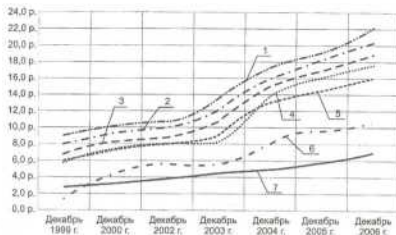


Рисунок 1.10 – Сравнительная стоимость различных видов топлива для автотранспортных средств за последнее время:

1 – бензин АИ-98; 2 – бензин АИ-95; 3 – бензин АИ-93; 4 – ДТ; 5 – бензин АИ-80; 6 – СУГ; 7 – КПГ

При этом если сравнить стоимость КПГ в странах, наиболее широко использующих его в качестве топлива на транспорте, то в России, учитывая значительные запасы природного газа и ценовую политику государства в газовой сфере, цена остается одной из самых низких. В таблице 1.4 приведены цены на КПГ в тех странах, которые активно занимаются реализацией его через АГНКС для транспорта (данные ОАО «Газпром» и НГА на 01.01.2006 г.).

Таблица 1.4 - Цены на КПГ в различных странах

Страна	Цена на КПГ, €/м <sup>3</sup>
Аргентина	0,14
Бразилия	0,29
Италия	0,47
США	1,27
Китай	0,18
Россия	0,18
ФРГ	0,49

В то же время стоимость ДТ в России составляет на сегодня около 0,50 €/литр. Согласно Постановлению Правительства РФ № 31 от 15 января 1993 г., стоимость 1 м<sup>3</sup> природного газа не может превышать 50 % стоимости одного литра бензина А-76, эквивалентного ему по энергоемкости, и составляет на 1 апреля 2006 г. 6 руб. 50 коп.

Сегодня по дорогам планеты передвигаются уже более 3 млн. автомобилей, потребляющих в качестве моторного топлива природный газ. Только в Италии таких автомобилей уже около 400 тыс., в России - около 47 тыс. Пока в России действует всего 218 газонаполнительных станций, что в значительной мере сдерживает интенсивность внедрения этого вида топлива.

Сегодня в нашей стране в год выбрасывается в атмосферу около 15 млн. тонн загрязняющих веществ. С ростом парка автомобилей и объемов пассажирских и грузовых перевозок доля автомобильного транспорта в загрязнении окружающей среды будет только увеличиваться. Потери от такого положения дел составляют 7...9 % ВВП [153].

В России вопросу перевода автотранспорта на альтернативные топлива в последнее время уделяется значительное внимание. ОАО «Газпром» вместе с Правительством РФ разработали проект Концепции по использованию на транспорте природного газа в качестве моторного топлива. Концепция предусматривает долгосрочный, до 2020 года, план газификации автотранспортных средств и мобильной сельскохозяйственной техники. Реализация Концепции проходит в три этапа.

На первом этапе парк автотранспортных средств, работающих на природном газе, увеличен на 35...40 % и на 1 января 2006 г. составил уже около 45 тыс. единиц.

Второй этап предусматривает дальнейшее развитие сети стационарных и мобильных средств заправки автотранспорта природным газом. Развитие сети будет проходить как в России, так и в странах СНГ. Это обеспечит внутригородские, междугородние и международные грузовые и пассажирские перевозки на природном газе, в том числе по проекту ООН «Голубой коридор». Реализация этого этапа позволит в 2006...2010 гг. увеличить количество транспорта, работающего на природном газе, на 120...140 тыс. шт. К 2011 году планируется довести этот показа-

тель до 190...210 тыс. шт.

На заключительном этапе в 2011...2020 гг. парк автомобилей, работающий на природном газе, должен быть увеличен до 1 млн., а число заправочных станций должно составить более тысячи. Газовым оборудованием в основном будут оснащены малотоннажные и легковые автомобили. В результате в 2015 году замещение нефтяных видов моторного топлива должно составить 1,5...1,7 млн. тонн в год, в 2020 году - 2,1...2,3 млн. тонн. Выбросы вредных веществ с ОГ в 2015 году снизятся на 750...850 тыс. тонн, а в 2020 году на 1...1,2 млн. тонн.

Уже сегодня ОАО «Газпром» готов перевести на природный газ более 80 моделей автомобилей. 5200 собственных автомобилей ОАО «Газпром» уже переведено для работы на КПГ.

Отдельно необходимо сказать о применении газомоторного топлива в АПК РФ. Президент Российской Федерации по итогам заседания президиума Государственного Совета Российской Федерации от 30 сентября 2004 г. поручил Правительству Российской Федерации рассмотреть вопрос о стимулировании широкомасштабного внедрения современных технологий в АПК, в том числе перевода сельскохозяйственной техники (автомобилей, тракторов и другой самоходной техники, используемой в сельскохозяйственном производстве) на газомоторное топливо.

25 октября 2004 г. вышло поручение Президента и Председателя Правительства РФ по газификации сельскохозяйственной техники, в котором отмечены мероприятия и предложены меры по внедрению газомоторного топлива в сельском хозяйстве.

Для реализации поставленных задач отраслевыми министерствами и департаментами с участием специалистов из ВНИИГАЗ, ГНУ ВИМ, НАТИ, МАДИ, НАМИ, «Газпром» разработан и активно внедряется комплекс мероприятий по переводу сельскохозяйственной техники на природный газ, который облегчит внедрение газомоторного топлива в аграрном производстве:

1. Создание газопользующих модификаций базовых мобильных и стационарных энергосредств, а также газопитающей топливной аппаратуры для серийной техники.

2. Разработка технологических схем и средств обеспечения природным газом машинно-тракторного парка и других газопотребителей сельхозпредприятий.

3. Организация технического обслуживания и ремонта оборудования и машин, использующих газомоторное топливо.

4. Подготовка нормативной и технологической документации для эффективного использования техники, работающей на природном газе.

Существующая в России система магистральных трубопроводов для транспортировки природного газа даст возможность создать широкую сеть газозаправочных станций. Уже сейчас сеть АГНКС позволяет заправлять природным газом более 250 тыс. автомобилей в год и выполнять на этом виде топлива внутригородские, междугородные и международные перевозки.

За последние 5 лет ОАО «Газпром» заключил соглашения с более чем 60 субъектами РФ, в которых, в частности, предусмотрен перевод автотранспорта на природный газ. В настоящее время проводится реализация этих программ.

Если перевод автомобилей с искровым зажиганием на КПГ уже освоен и широко применяется в России, промышленностью выпускаются газовая аппаратура и газобаллонное оборудование (ГБО) для таких двигателей, то вопросы перевода на газовое топливо дизелей еще недостаточно изучены. При переводе дизелей на природный газ возникают определенные трудности, связанные с организацией рабочего процесса при работе на природном газе, для решения которых требуются дополнительные исследования в этой области.

Так, одним из способов перевода дизелей автомобилей для работы на КПГ является модернизация их для работы по так называемому газодизельному циклу. Этот способ работы обладает рядом преимуществ перед работой двигателя по чисто газовому процессу. Во-первых, обеспечивается двухтопливность двигателя и его конвертация, т.е. в случае отсутствия газа двигатель может работать по дизельному процессу как базовый, что значительно расширяет возможности использования автотранспортного средства. Во-вторых, относительно низкая стоимость такой модернизации при переводе двигателя с дизельного на газодизельный процесс, которая не требует значительных капиталовложений и внесения серьезных конструктивных изменений в уже выпускаемые двигатели. В-третьих, применение экологически более чистого топлива - природного газа - позволяет значительно снизить

отрицательное влияние автотранспорта на окружающую среду и выброс токсичных компонентов.

Отмеченные преимущества газодизелей обеспечивают возможность достаточно широкого их использования в различных областях народного хозяйства РФ как в автотранспортном комплексе, так и в АПК.

Российский транспортный комплекс в основном оснащается двигателями отечественного производства, причем основную долю составляют традиционные поршневые двигатели. Выработка около 85 % энергии, ДВС являются, как уже отмечалось, основными потребителями нефтяного топлива. Так, автотранспорт в странах СНГ потребляет в год около 60 млн. тонн топлива, причем потребность в топливе постоянно возрастает [200]. Отмечено, что транспортные двигатели потребляют более 90 % жидкого нефтяного топлива, которого, по официальным статистическим данным, было произведено в России в 1999 г. около 74 млн. тонн (26,8 млн. тонн автомобильных бензинов и 46 млн. тонн ДТ). В перспективе доля потребления нефтяных топлив, используемых для энергетических установок с ДВС, будет снижаться в связи с сохранением на прежнем уровне добычи нефти в России и увеличением ее потребления химической промышленностью в ближайшие годы.

В странах Западной Европы вопросу замещения нефтяных топлив альтернативными в последнее время уделяется огромное внимание.

Так, в мае 2003 г. на конференции в Порто было отмечено, что одним из главных мотивов перевода транспорта на природный газ стала необходимость поддержания энергетической безопасности Европы, так как транспортный сектор Европы на 98 % зависит от нефти. Если в ближайшее время не будут предприняты конструктивные меры, то к 2030 году Евросоюз на 70 % будет зависеть от импортных энергоносителей. При этом нефтяная зависимость автомобильного транспорта составит примерно 95 %, поэтому европейским странам необходимо сместить свой топливно-энергетический баланс в сторону максимально возможного замещения нефти другими энергоносителями, поступающими из новых источников.

А во-вторых, внедрение альтернативных источников энер-

гии для автотранспорта должно предотвратить ухудшение экологической обстановки.

Именно поэтому было сформулировано предложение о переводе к 2020 году 23 % автомобилей Старого Света на альтернативные виды топлива: природный газ – 10 % (23,5 млн.) машин, биогаз – 8 % (18,8 млн.) машин и водород (топливные элементы) – 5 % (11,7 млн.) машин. В соответствии с этими планами суммарный объем потребления природного газа автотранспортом к 2020 г. может составить почти 47 млрд. м<sup>3</sup> в год (рис. 1.11).

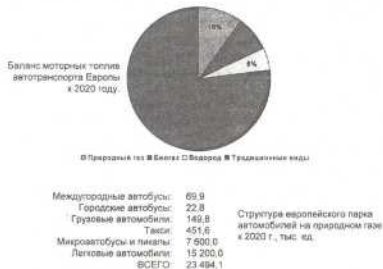


Рисунок 1.11 - Концепция ЕЭК ООН о внедрении на транспорте альтернативных видов топлива

При работе транспортных средств на КПГ наблюдается заметное улучшение экологических характеристик ДВС. Для грузовых автомобилей грузоподъемностью до 3 тонн выбросы загрязняющих веществ при работе на КПГ по сравнению с работой на бензине меньше в 1,78 раза по оксиду углерода; в 1,12 раза по оксидам азота; в 1,11 раз по диоксиду серы; в 10 раз по формальдегиду; в 2,25 раза по бенз(а)пирену; в 1,2 раза по углеводородам



[306]. Еще большее снижение выбросов отмечается в группе грузовых автомашин грузоподъемностью более 3 тонн. Выброс токсических составляющих (г/км) в окружающую среду снижается в среднем по оксиду углерода – в 8 раз, углеводородам – в 3 раза, оксидом азота – в 2 раза, дымности ОГ – в 9 раз, бенз(а)пирена – в 5 раз [306].

Природный газ уже широко используется в качестве топлива в Италии, Канаде и Новой Зеландии. Например, только в 2001 г. компания FIAT продала 17 тыс. автомобилей, работающих на КПГ. В Италии, по оценкам специалистов, находятся в эксплуатации примерно 400 тыс. газовых автомобилей, а компания FIAT со своей крупнейшей и разнообразной программой выпуска газовых автомобилей является лидером соответствующего сегмента рынка [12]. В Германии насчитывается пока всего около 30 тыс. единиц, однако, по мнению специалистов, уже в 2010 г. здесь будут курсировать порядка 300 тыс. автомобилей, работающих на КПГ, а до 2020 г. их количество возрастет еще в 2 раза. В стране уже зарегистрированы 600 газозаправочных станций, а к 2007 г. их количество должно увеличиться до 1000, что позволит обеспечить газом почти 1 млн. автомобилей [12]. В пользу газовых автомобилей свидетельствует целый ряд фактов, иллюстрирующих увеличивающуюся популярность этих транспортных средств. Так, в южносаксонском Хемингце в одном из автопарков насчитывается 130 газовых автомобилей, за счет чего удалось сэкономить на стоимости топлива 116 тыс. евро, на 2006 г. были запланированы 200 тыс. € экономии [12]. Немецкой компании DHL в 2005 г. поставлены для почтовых перевозок 50 легких грузовиков на базе моделей IVECO специальной разработки, оснащенных газовыми двигателями. Компания Irisbus поставила к Олимпийским играм в Афинах 400 автобусов, работающих на газе, а всего было продано примерно 2500 единиц таких автобусов [125]. В Советском Союзе так же был накоплен положительный опыт эксплуатации газовых автомобилей (ГАЗ, ЗИЛ, КамАЗ), уже в 80-х годах XX века в СССР серийно выпускали автомобили, работающие на природном газе.

Таким образом, как за рубежом, так и в нашей стране весьма актуальной является проблема экономии моторного топлива, изготовленного из нефти, возможности его замены на альтернатив-

ные виды для использования в двигателях транспортных средств. При этом необходимо иметь в виду, что значительная часть транспортных средств оснащена дизельными двигателями, имеющими высокую топливную экономичность (на 25...30 %) и экологическое преимущество (в 1,5...2 раза) по сравнению с бензиновыми двигателями [199]. Учитывая данные преимущества, дизели нашли применение практически во всех отраслях народного хозяйства нашей страны, вследствие чего уровень загрязнения окружающей среды ОГ дизелей неуклонно возрастает, поэтому особую актуальность представляют исследования по переходу для работы на КПГ именно данного сектора ДВС АТС.

#### 1.4. Существующие типы газодизелей

В настоящее время газодизельные модификации ДВС получают достаточно широкое распространение, и количество таких типов двигателей постоянно растет.

Так, на ОАО «ЛАЗ» (Украина) в настоящее время проводятся разработки и налажен выпуск газодизельных автобусов модели 1414-03, оснащенных дизелями ЯМЗ-236А, ЯМЗ-236НЕ, ЯМЗ-236НЕ2, переоборудованными для работы по газодизельному циклу, мощностью 143...169 кВт. Срок окупаемости газобаллонного оборудования составил 2,8 года.

Еще в СССР было разработано и выпускалось большое количество стационарных дизелей, модернизированных для работы по газодизельному циклу. Выпускались газодизели типа В2-300ГД, 1Д12, В2-450, М-601 и др. [310 и др.].

За рубежом разработкой и производством газодизелей большой мощности в разное время занимались фирмы «Зульпер» (ФРГ), «Делаваль-Энтерпрайз» (США), «Мирлесс», «Пилстик», «Инглиш-электрик» (Великобритания), «МWM», «Иенбахер» (Австрия) [310].

Автомобильной промышленностью РФ были разработаны и освоены в производстве газодизели КамАЗ моделей 744 и 749 для автомобилей-тягачей КамАЗ моделей 53208 и 53218. В них предусмотрена установка во впускном трубопроводе смесителя-дозатора, который подает газовое топливо в воздух и управляет

количеством поступающей в дизель рабочей смеси, то есть осуществляется количественное регулирование мощности. Поршни запального ДТ на всех режимах остается неизменной и составляет 20 % от общего расхода топлива. На режиме холостого хода двигатели работают только на ДТ.

В дизеле ЯМЗ-236 (6Ч 13/14), переоборудованном в газодизель в Киевском автомобильно-дорожном институте (КАДИ), применено качественное регулирование мощности путем изменения подачи газообразного топлива с помощью дозатора газа при регулируемом поступлении воздуха. Проведены экспериментальные исследования указанного дизеля.

В Кировском СХИ (сегодня Вятская ГСХА) по заказу Минсельхозмаша СССР были разработаны и изготовлены макетные образцы тракторов Т-25А (1987 г.), Т-16МГ (1988 г.), «Универсал-445» (1990 г.) с системой питания, модернизированной для работы на КПГ. Кроме этого, был разработан газодизель Д-144 и на его базе был создан макетный образец сварочной установки АДД-4002У1 (1989 г.) и самоходный погрузчик 17.92 (1991 г.) для работы на КПГ. В 2002 г. был создан макетный образец трактора МТЗ-80 с системой питания модернизированной для работы на КПГ и комплексной системой снижения токсичности ОГ [133, 194, 196, 198, 200...202, 212, 213, 377...380 и др.].

Большое внимание уделяется работам по разработке газодизельных модификаций дизелей в ФГУП «НАМИ». Совместно с НИЦИАМТом в 2002 г. на газодизельный процесс переведен дизель «Татра Т-3-929» самосвала Татра-815С2 с непосредственным впрыскиванием рабочим объемом 15,8 л, степенью сжатия 16,5. Расход топлива газодизеля составил: ДТ – 16 л/100 км, газ – 24,5 м<sup>3</sup>/100 км. Максимальная скорость и динамика автомобиля «Татра-815С2» при переходе с базового дизеля на газодизель, созданный на его основе, меняются незначительно: по максимальной скорости газодизельный вариант уступает дизельному на 1,7...2,0 %, по разгонным характеристикам несколько больше – на 11...12 %.

Также, по контракту с Корейским институтом машиностроения и металлов разработана газодизельная модификация выпускаемого на заводе в Сеуле легкого (грузоподъемность 3,5 т) грузового автомобиля К-3500 с серийным дизелем SL-2

(4Ч 10,0/10,0) с непосредственным впрыскиванием рабочим объемом 3,45 л, степенью сжатия 17,5 и углом опережения впрыскивания топлива 19° п.к.в.

На базе дизеля РАБА Д2156Н6И (Венгрия) рабочим объемом 10,35 л, степенью сжатия 17,0 и плеченым смесообразованием разработана газодизельная модификация, прошедшая успешные испытания на двух автобусах – сочлененном «Икарусе-280» и обычном «Икарусе-260».

Компания IVECO предлагает для легких грузовиков Daily S двигатель, работающий на КПГ. На шасси этих автомобилей могут устанавливаться бортовые платформы, фургоны, специальные кузова. Баллоны с газом, монтируемые под полом, обеспечивают запас хода от 230 до 360 км. Базовым двигателем послужил дизель объемом 2,8 л и мощностью 106 л.с. По утверждению компании автомобиль выдает нормы Евро-5.

Также вопросами использования КПГ в качестве топлива на транспорте занимаются МАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НАТИ, ВНИИГАЗ и др.

Первоначально газодизели получили наибольшее распространение в качестве стационарных и судовых силовых установок. В настоящее время особую актуальность приобрели разработки газодизельных модификаций автомобильных двигателей, поэтому в данном направлении выполнен ряд работ, результаты которых нашли практическое применение.

В конце 2005 г. на 3-й Международной специализированной выставке «GazSUF» компания «Уралтрансгаз» совместно с НПО «Гелиумаш» представили разработанный газовый вариант седельного тягача КамАЗ-5410, особенностью которого является криогенная топливная система, предназначенная для использования сжиженного природного газа.

В Национальном транспортном университете (НТУ, г. Киев) совместно с Институтом газа Национальной академии наук Украины (ИГ НАН Украины) разрабатываются системы питания и регулирования для конвертирования автомобильных дизелей в газодизели. В результате научных разработок создан целый ряд газодизельных модификаций различных дизелей: ЯМЗ-238, ЯМЗ-240, СМД-23.07 и др. [92, 93, 95], имеется опыт создания газобаллонного автомобиля БелАЗ [59].

Для автомобилей КраЗ разработан газодизель СМД-31.15 с двухрежимным регулятором частоты вращения, имеющий систему штифта и регулирования, особенностью которой является непрерывная подача газа во впускной трубопровод под приблизительно постоянным избыточным давлением, которое можно настраивать в пределах от 0,01 до 0,04 МПа. При таком способе расход газа через дозатор очень мало зависит от частоты вращения коленчатого вала, поэтому при снижении частоты вращения цикловая подача газа в цилиндры газодизеля увеличивается, соответственно увеличивается крутящий момент, т.е. происходит самокорректирование подачи газа, обеспечивая получение большого запаса крутящего момента [42].

По данным целого ряда работ отечественных исследователей [59, 92, 95, 313 и др.] известно, что для работы по газодизельному циклу были переведены 12-цилиндровые дизели ЯМЗ-240 и ЯМЗ-240-ОН1 (12С 13/14) и двигатель ЯМЗ-238ГД (8С 13/14). Разработанные модификации дизелей были испытаны на грузовых автомобилях общего назначения МА3-500А-ГД и КраЗ-256Б-ГД, на большегрузных карьерных самосвалах БелАЗ-548А-ГД грузоподъемностью 38 тонн, на автомобильном кране КС-3577-2 и на агрегате А-50 для освоения нефтяных и газовых скважин. Проведенные испытания показали отсутствие снижения мощности на газодизельном варианте, возможность практической эксплуатации при значительном сокращении затрат на моторное топливо. В работе [93] сообщается, что проведены работы по переводу на природный газ 6-цилиндрового дизеля СМД-62 на базе трактора Т-150К и созданию газодизеля 8ЧН 25/34-ЗГД.

В настоящее время целый ряд мировых автомобильных компаний занимается разработкой и производством газодизелей различной размерности для оборудования автотранспортных средств.

В работе [472] имеются сведения о том, что японская фирма «Тойота» разработала систему питания дизелей, переводимых с ДТ на газ по двухтопливной схеме. К примеру, модернизированы для работы на природном газе 4-цилиндровый дизель с вихревой камерой «Рикардо Комет» МК-5 и серийный дизель с турбонадувом объемом 1,47 л.

В настоящее время компания Cummins выпускает 6 цилиндр-

ровые двигатели объемом 5,9 и 8,3 л В Gas Plus Евро-3 и С Gas Plus Евро-3, которые могут работать на сжатом и сжиженном природном газе и используются на автомобилях средней грузоподъемности и автобусах. Известная фирма MAN производит городской автобус MAN Lionis Citi, оборудованный двигателем мощностью 245 л.с., работающем на природном газе, который уже сегодня выполняет нормы Евро-5.

По всему миру эксплуатируются более 2500 автобусов MAN и Neoplan, использующих КПГ в качестве моторного топлива. Газовый двигатель MAN E 2876 LUN 03 уже сегодня выполняет строгие стандарты EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicles), которые находятся в пределах норм Евро-5, вводимых позже, кроме этого указанным требованиям отвечает газовый двигатель компании VOLVO, устанавливаемый на автобусы [125].

Учитывая приведенные сведения, можно сделать вывод, что к настоящему моменту накоплен определенный опыт переоборудования дизелей для работы на природном газе, в частности имеются примеры использования двигателей, конвертированных для работы по газодизельному циклу как в нашей стране, так и за рубежом.

Вместе с тем необходимо констатировать факт, что работ, посвященных переводу автомобильных быстроходных дизелей с турбонадувом рабочим объемом до 5 л. на сегодняшний день недостаточно. При этом практически отсутствуют работы, посвященные исследованию рабочего процесса, показателей процесса сгорания, смесеобразования и характеристик тепловыделения и образованию токсичных компонентов в цилиндре газодизельных модификаций двигателей. Поэтому данное направление исследований играет значительную роль в обеспечении дальнейших перспектив развития транспортного комплекса России.

## 1.5. Особенности рабочих процессов дизельных и газодизельных двигателей с турбонаддувом

### 1.5.1. Основные характеристики топливонадачи, впрыскивания и распыливания топлива в КС дизеля и газодизеля

Известно, что в процессе истечения из сопла форсунки струя углеводородного топлива разгоняется до больших скоростей. Сразу же после ее вылета происходит резкое расширение струи. Гидравлический удар совместно с турбулентными пульсациями и волновыми колебаниями порождает силы, превосходящие поверхностное натяжение жидкости, что приводит к распаду струи на капли, каждая из которых движется с определенной скоростью. При впрыскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку в цилиндре газодизеля с турбонаддувом происходит распад одиночных струй и их взаимодействие в КС с образованием характерных зон с различной концентрацией углеводородного топлива в МВС.

Дизельный топливный факел появляется и развивается в течение всего периода впрыскивания топлива, осуществляемого по строго заданному закону в определенные фазы рабочего цикла при очень малой продолжительности и направлении топлива в определенные области КС. При этом мельчайшие топливные частицы впрыскиваются с большими скоростями и незначительной дальностью, в зависимости от перепада давлений в распылителе. Топливный факел имеет циклический характер, так как образуется и прогрессирует при перемещении давления подачи, поэтому начальной задачей описания рабочего процесса в цилиндре дизеля является установление закономерностей развития топливного факела, его геометрических размеров и физической структуры.

Динамика подачи топлива достаточно полно оценивается так называемой характеристикой впрыскивания топлива в дифференциальной или интегральной формах: первая характеризует скорость поступления топлива в КС, а вторая - долю вырванного топлива. Оценочным критерием впрыскивания также является продолжительность впрыскивания, показывающая время в граду-

сах п.к.в., в течение которого топливо поступает в цилиндр [354].

Вместе с тем большое значение имеет характеристика давления впрыскивания, определяющая мелкость распыливания топлива, скорость распространения и дальность факела. Мелкость распыливания обуславливает интенсивность процессов теплообмена внутри факела (микросмешение), а параметры топливного факела - охват топливом объема КС, вовлечение воздуха в теплофизические процессы (макросмешение) и вероятность возникновения пристеночного смесеобразования.

Проведенный анализ исследований [13, 50, 208, 312, 352, 354...357 и др.] позволяет утверждать, что существующие методы экспериментального исследования характеристик распыливания топлива форсунками не дают полной и объективной информации о динамике и структуре нестационарной импульсной струи топлива, впрыскиваемой в высокотемпературную среду с переменной плотностью, особенно в условиях начавшегося горения, а представления о структуре дизельного топливного факела не получили окончательного развития, так как современные модели базируются на различных предположениях, порой достаточно противоречивых и не отражающих физическую картину явлений.

В ранее выполненных исследованиях развитие топливного факела в цилиндре дизеля описывалось так называемой объемной моделью, в которой плотность распределения капель внутри факела и их скорости уменьшаются по мере удаления от сопла примерно по степенной зависимости гиперболического типа. Однако объемная модель факела не объясняет полученные в последнее время данные о незначительном торможении капель в осевом потоке между соплом и фронтом факела, большой концентрации жидкого топлива во фронтальной зоне и др. С этими данными хорошо согласуется зонная модель нестационарного топливного факела, в соответствии с которой движение топлива имеет струйный характер, т.е. последующие капли летят вслед за предыдущими, поскольку за быстро движущимися частицами образуется зона пониженного давления, способствующая увлечению следующих капель на ту же траекторию [352]. Капли летят вплоть до переднего фронта факела по расходящимся лучам траекториям практически без торможения, с постоянными скоростями, близкими к скорости истечения топлива из сопла распылителя. Во фронте факела резко возрастает

сопротивление окружающей среды продвижению каплей и происходит их быстрое торможение. При потере скоростей головной частицей через короткое время ее нагоняет и вливается в нее следующая за ней частица. Получив новый импульс и увеличив массу, фронтовая частица скачком увеличивает скорость, после чего снова начинается режим ее торможения. Такой цикл повторяется многократно. Масса фронтовых частиц изменяется (вследствие коагуляции и испарения), а их средняя скорость постепенно затухает. Таким образом, в топливном факеле можно выделить две зоны: фронтовую с высокой плотностью распределения частиц, движущуюся со скоростью вершины факела, и зону шлейфа с более редким распределением капель, летящих с общепринятыми скоростями почти без торможения [352 и др.].

Во многих исследованиях отмечается, что частицы в факеле движутся независимо только при расстоянии между каплями более  $6d_k$  по фронту движения и  $12d_k$  ( $d_k$  — диаметр капли) по направлению движения частиц [13, 50, 312, 352, 353]. При этом если капли движутся на расстоянии менее  $6d_k$  по фронту, скорость их несколько возрастает по сравнению с одиночной каплей, что объясняется частичным уменьшением трения со средой в тех частях периметра, которыми они обращены друг к другу. Частицы расталкиваются, так как падает давление за каплей и повышается по сторонам от нее. В то же время при движении каплей друг за другом последующая капля не отстает от предыдущей, если находится на расстоянии меньше  $12d_k$ . Видно, это связано с возникновением на трассе движения каплей воздушной турбулентной дорожки, которая характерна спутным потокам газа, что снижает сопротивление движению каждой последующей капли. Примерный расчет средней плотности рассеивания частиц топлива в факеле показывает, что среднее расстояние между частицами не превышает вышеуказанных значений.

Например, если принять, что впрыскивается  $V_{\text{в}} = 100 \text{ мм}^3$  топлива и капли имеют характерный для ДТ размер  $10 \text{ мкм}$ , то число частиц в факеле  $z = 0,25 \cdot 10^9$ , а средний объем, приходящийся на каждую частицу,  $V_{\text{ч}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^3$ . Тогда среднее расстояние между частицами составляет  $l_{\text{ч}} = 0,075 \text{ мм}$ , откуда следует  $l_{\text{ч}}/d_{\text{ч}} = 75/10 = 7,5$ .

Допуская равномерное распределение капель, можно отме-

тить, что частицы находятся на расстояниях, вызывающих взаимодействие, однако распределение капель неоднородно и по фронту, и по направлению движения, поэтому возникают области, где расстояния больше критических (периферия факела), и области, где они существенно меньше (ядро факела), что характерно для устья факела с высокой плотностью частиц, так как они образуются из цельной струи при её распаде.

Рассмотрение физической модели динамики и структуры факела распыленного топлива в дизелех с турбонаддувом является чрезвычайно сложной задачей, однако проведенные исследования позволяют, с некоторыми доработками, уточнить зонную модель топливного факела. Известно, что истечение топлива из форсунки — процесс неустановившийся, зависящий не только от перепада давлений, но и от движения запорного органа форсунки, гидродинамических характеристик каналов распылителя, сжимаемости и вязкости используемого топлива. Во время истечения топлива из распылителя дизельной форсунки с высокими скоростями распад струи начинается непосредственно вблизи сопла. При этом первоначально образуются капли, пленки и крупные капли, которые затем под действием турбулентных пульсаций, сил поверхностного натяжения и аэродинамического сопротивления дробятся на более мелкие капли [303].

Основная причина распада струи — турбулизация потока в распылителе форсунки, происходящая в результате дросселирования, изменения сечения и направления потока, а также обтекания острой входной кромки и шероховатости соплового отверстия. Возникающая в распылителе турбулентность потока сохраняется некоторое время и на начальном участке полета струи в газовой среде; она вызывает поперечные пульсации потока распыленного топлива и дальнейший распад жидких частиц [13].

Энергия турбулентных пульсаций пропорциональна кинетической энергии жидкого потока в распылителе, т.е. квадрату скорости потока. В связи со значительным изменением скорости истечения топлива и ее пульсацией изменяются интенсивность турбулентности струи и мелкость распыления топлива. В начале впрыскивания скорость истечения топлива велика, но значительные турбулентные возмущения потока в каналах распылителя, связанные с дросселированием потока под иглой и заполнением каналов

распылителя топливом. После посадки иглы форсунки на упор скорость впрыскивания достигает большего значения, поэтому турбулизация потока также велика. В конце впрыскивания скорость потока снижается, возмущения потока при движении иглы от упора к седлу меньше, чем при подъеме иглы, в связи с чем турбулизация струи резко уменьшается. В результате наблюдается быстрое уменьшение среднего диаметра капель распыленного топлива в начале впрыскивания, малое его изменение в течение основного и значительное увеличение в конце [303].

Под влиянием пульсаций скорости истечения топлива из форсунки и поперечных турбулентных пульсаций потока жидкости струя распыленного топлива вблизи форсунки имеет волновую форму с местными расширениями (уплотнениями) и сужениями (разрежениями) потока. Это явление объясняется разрывом вытекающей из распылителя струи на отдельные распадающиеся порции топлива. Рост скорости истечения топлива из форсунки в начальной фазе впрыскивания, уменьшение скорости в заключительной фазе и пульсации скорости вызывают своеобразное двухстадийное развитие факела распыленного топлива в условиях дизеля: струное на начальном участке (участок резкого торможения факела) и струйное на основном.

На начальной стадии в развивающийся факел периодически с частотой пульсаций скорости истечения топлива из форсунки врываются высокоскоростные струи, которые быстро продвигаются к головной части факела, раздвигая и уплотняя ранее сформировавшийся поток капель. При этом дискретные скопления капель, движущихся от форсунки, рассредоточиваются, разреженные перегородки между ними уплотняются. Из-за аэродинамического сопротивления внутри факела в лобовой части каждой последующей пульсирующей струи образуется уплотненный передний фронт. На участках резкого нарастания скорости впрыска отдельные струи могут преодолеть лобовое сопротивление и выдвинуться в авангард факела, перекрыть одну или несколько предыдущих струй. В данном случае передние фронты этих струй совмещаются, образуя местные сгустки капель. Отдельные сталкивающиеся капли могут слиться в более крупные частицы, что также увеличивает местную концентрацию топлива [312].

При подаче больших порций топлива и при большой дальности

бойности факела происходит дальнейшее изменение его структуры на второй стадии развития. В поперечном сечении факела плотность распределения капель и их диаметры быстро уменьшаются при удалении от центра. В связи с этим периферийные потоки капель тормозятся быстрее, чем осевой поток, постепенно отстают и отрываюся от него. На участке возрастающей скорости впрыскивания топлива высокоскоростной осевой поток элементарной пульсирующей струи догоняет осевой поток предыдущих струй, внедряется в него, подталкивает и уплотняет его. Одновременно в связи с сопротивлением окружающей среды уплотняется осевой поток и со стороны головной части факела. При этом возможна коагуляция (слияние) отдельных капель. В результате указанных процессов после начальной стадии развития факела в его головной части формируется протяженное осевое капельножидкое ядро с повышенной плотностью распределения частиц (расстояние между ними порядка диаметра капель), окруженное сравнительно разреженной оболочкой из отстающих капель (расстояние между каплями на порядок больше их диаметра). В ядре факела движение капель имеет струйный характер, что создает условия для большой скорости полета частиц [352]. В результате подпитки осевого ядра последующими порциями топлива постепенно увеличивается его масса и длина. Образуется своеобразная кумулятивная струя, обеспечивающая продвижение факела в глубь камеры [415]. Передняя часть струи, встречая повышенное сопротивление окружающей среды, деформируется, разрушается и отбрасывается в сторону, образуя уплотненный грибовидный передний фронт факела. Капли, попавшие во фронт, быстро тормозятся, отстают от продолжающей движение вершины факела и постепенно рассредоточиваются турбулентными газовыми потоками внутри оболочки факела. Скорость продвижения капель в ядре меньше скорости истечения из сопла, но больше скорости вершины факела. При развитии факела происходит непрерывное разрушение передней части осевой струи и обновление фронта факела.

Предположительно, развитие топливного факела определяется движением его фронтальной зоны. Принятая модель [354] позволяет рассматривать зону фронта факела как тело переменной массы, к которому непрерывно подводится топливо из шлейфа фа-

кела. С другой стороны, окружающая среда за счет сил аэродинамического сопротивления препятствует продвижению зоны факела. Тогда в момент времени  $\tau$ , когда фронт факела продвинулся от сопла на расстояние  $x$ , текущая масса топлива в зоне фронта факела будет  $M$ , а скорость фронта факела —  $U_{\phi}$ . За промежуток времени  $dt$  в зону фронта из шлейфа подлетает элемент массы топлива  $dM$  со скоростью  $U_s$ . Здесь под элементом массы топлива понимается совокупность капель, достигших зоны фронта факела за время  $dt$ . Его масса может быть определена из характеристики топливозадачи. За это же время  $dt$  скорость фронта факела изменится на величину  $dU_{\phi}$ , поскольку действует сила аэродинамического сопротивления  $Q$ . Применив закон изменения количества движения, получим

$$(M + dM)(U + dU_{\phi}) - MU_{\phi} - dMU_s = -Q dt. \quad (1.1)$$

После преобразования выражения (1.1) уравнение движения фронта факела представим в следующем виде

$$M \frac{dU_{\phi}}{dt} = -Q + \frac{dM}{dt} (U_s - U_{\phi}). \quad (1.2)$$

При изменяющемся давлении топливозадачи текущая скорость выпрыскивания является переменной и определяется через текущее давление выпрыскивания:

$$U_{\text{всп}} = \phi_s \sqrt{2(p_{\text{всп}} - p_c / \rho_s)}, \quad (1.3)$$

где  $p_c$  — давление газовой среды;

$\phi_s$  — коэффициент скорости;

$\rho_s$  — плотность топлива.

Если принять  $U_s = U_{\text{всп}}$  для частиц топлива, то  $U_s$  будет так же функцией давления выпрыскивания или времени. При этом  $U_s$  окажется зависящей от  $x$  и характеристики выпрыскивания, так как подлетающий элемент топлива может состоять только из тех час-

тих, которые к данному времени  $\tau$  могут достичь зоны фронта и момент выпрыскивания которых  $\tau_1$  удовлетворяет неравенству

$$\phi_s \sqrt{2(p_{\text{всп}} - p_c / \rho_s) (\tau - \tau_1)} \geq x, \quad (1.4)$$

Масса элемента топлива  $dM$ , подлетающая к фронту в интервале времени  $\tau - \Delta\tau$ ,  $\tau$ , составит величину

$$dM = \varepsilon_s \rho_s \frac{\pi d_s^2 v_s}{4} \int_{\tau - \Delta\tau}^{\tau} U_{\text{всп}} dt. \quad (1.5)$$

Масса топлива в зоне фронта факела  $M$  определяется суммированием масс элементов топлива, достигших зоны к моменту  $\tau$ . Для определения среднего диаметра капель могут использоваться уравнения, описывающие функцию распределения капель по размерам в зависимости от давления выпрыскивания, физических свойств газа и жидкости, а также геометрии сопла.

Анализируя результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики и структуры топливных факелов [50, 63, 80, 139, 140 и др.], можно предположить следующую структурную схему факела распыленного в МВС топлива, учитывающую особенности выпрыскивания в наддувных двигателях.

Возможно предположить, что при большой плотности метановоздушного заряда, характерной для наддувных дизелей, будет происходить более быстрое и значительное торможение капель в периферийных струях шлейфа факела по сравнению с осевым потоком. В объеме факела обнаруживается значительная неоднородность распределения в МВС капель распыленного ДТ в поперечном и в продольном направлениях. Наибольшая концентрация капель создается в осевом ядре, в переднем фронте факела и во фронтах элементарных пульсирующих струй. Видимо, в шлейфе факела частицы топлива выстраиваются по трассам, двигаясь почти без замедления при незначительном тепло- и массообмене, сопровождаемые потоком МВС, а во фронтальной зоне резко выступают в тепловое и силовое взаимодействие с МВС. Кроме этого, в продольном сечении факела концентрация капель изме-

яется в зависимости от скорости впрыскивания топлива и соответствующей ей скорости разрушения осевой струи. Капли, лежащие по расходящимся траекториям от сопла, не могут самостоятельно продвигаться на большую глубину и заполняют лишь небольшой объем факела, примыкающий к соплу. В остальной объем развитого факела капли поступают, по-видимому, более сложным путем: основная масса капель транспортируется скоростью осевой струей, достигает головной части факела, где встречается с невозмущенной МВС и затем рассеивается в шлейфе за перемещающимся фронтом факела. Наряду с этим возможен также отрыв некоторого количества капель от боковой поверхности осевой струи. Расположение капли по длине факела еще не определяет время ее пребывания в цилиндре. Действительно, капли, образовавшиеся в начале впрыскивания и МВС и попавшие на периферийные траектории, могут оказаться недалеко от распылителя, в то время как в головной части факела будут находиться капли, образовавшиеся на более поздних стадиях впрыскивания.

### 1.5.2. Особенности процессов смесеобразования, воспламенения и горения в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом

По оценкам исследователей условия возникновения и развития пламени в цилиндре дизеля зависят от типа смесеобразования, фазы горения и локальных температурно-концентрационных и гидродинамических характеристик заряда [312]. Рабочий процесс современных дизелей с турбонаддувом отличается высокими параметрами состояния газового заряда цилиндра в конце сжатия, а горение в наддувках газодизелях происходит в условиях длительного существования многофазной топливовоздушной смеси. Одним из главных условий развития дизельного процесса является наличие в КС высоких температур и давлений, так как движение капель топлива с очень большими скоростями в горячей и плотной среде вызывает развитие одновременно трех процессов: торможения, нагрева и испарения капель. В соответствии с принятой моделью топливного факела теплообмен между воздухом и

частицами топлива невелик в шлейфе, а в основном происходит в зоне фронта факела, где капли встречаются со средой. Предполагается, что в стационарном топливном факеле имеется многофазный топливовоздушный заряд за зоной фронта, а жидкое топливо в основном находится только во фронте факела. В процессе теплообмена в зоне фронта факела температура и капель топлива, и среды окружающего микрообъема стремятся друг к другу, поэтому условно конец каждого процесса теплообмена будет характеризоваться равенством местных температур топлива, воздуха и смеси:  $T_f = T_g = T_p$ . Следовательно, теплообмен в факеле можно свести к совокупности микропроцессов тепломассообмена единичных капель топлива, находящихся в зоне фронта, при обтекании их потоком газа со скоростью  $U_f$  и с учетом механизмов испарения и коагуляции в зоне фронта факела. Для частного случая без коагуляции возможно применение методики расчета нагрева и испарения капель [354] на основании следующих уравнений:

движения капли топлива:

$$\frac{dU_x}{dt} = -\frac{3}{8} c_x \frac{\rho_m U_x}{\rho_x r_x} \quad (1.6)$$

подвода теплоты к капле:

$$q = 2\pi R_{\infty} Nu \cdot r_x (I_r - I_s) \frac{z}{e^z - 1} \quad (1.7)$$

прогрева капли:

$$\frac{df_x}{dt} = \frac{1}{m_x c_{px}} \left( q - \frac{dm_x}{dt} \lambda \right) \quad (1.8)$$

скорости испарения капли:

$$\frac{dm_x}{dt} = -\frac{\pi d_x G_r D}{RT} Nu \cdot \rho_f \ln \frac{p}{p_r - p_{r1}} \quad (1.9)$$



При решении системы уравнений исходными данными являются начальные размер, температура и скорость капли, давление и температура газовой среды, определяются же во времени количество теплоты, поглощенное каплей, количество испаренного топлива, температура жидкости, радиус капли и т.д. Знание характеристик испарения топлива необходимо для понимания природы смесеобразования и сгорания при дизельном и газодизельном процессах работы двигателя.

Эффективность работы ДВС – его мощностные и экономические показатели – в значительной степени определяется и лимитируется особенностями процесса сгорания. По мнению специалистов, требования к процессу сгорания в двигателях могут быть сформулированы в общем виде следующим образом: сгорание должно обеспечивать своевременное и возможно более полное выделение теплоты с оптимальными в отношении допустимой «жесткости» работы двигателя скоростями повышения давления при минимальных потерях теплоты в стенки, так как замедленное сгорание приводит к снижению эффективности рабочего цикла из-за уменьшения фактической степени расширения [52]. До настоящего времени отсутствуют точные методы расчета процессов горения в двигателях. Причина этого заключается в том, что горение представляет собой крайне сложный процесс, развивающийся в условиях быстро изменяющихся температур и концентраций реагирующих веществ.

В данном случае вопрос чрезвычайно осложнен тем, что химическое превращение, составляющее основу процесса горения, осуществляется в условиях обязательно сопутствующих ему физических процессов тепло- и массообмена. Тесное взаимодействие процессов химического превращения и физических процессов теплопередачи и диффузии составляют основную, неотъемлемую сущность процесса горения, причем формы такого взаимодействия могут значительно различаться в тех или иных конкретных случаях. Формы взаимодействия определяются, с одной стороны, особенностями химических реакций, в частности, зависимостями их скоростей от температуры и концентрации исходных веществ и образующихся промежуточных продуктов, а с другой – особенностями процессов переноса, скорость которых, в свою очередь, тоже зависит от температуры. В большинстве тех-

нических процессов горения исходная смесь не бывает однородной – горение происходит в условиях одновременно идущих процессов испарения капель жидкого топлива и смешения его паров с воздухом, причём теплота, необходимая для испарения топлива, подводится из зоны химического превращения. В таких случаях процессы тепло- и массообмена приобретают еще большее значение и оказывают решающее влияние на скорость горения.

Важным этапом в создании теории горения явилась разработка одним из крупнейших ученых, лауреатом Нобелевской премии, академиком Н.Н. Семеновым основ теории цепных химических реакций и теории теплового взрыва. Идея Н.Н. Семенова получили дальнейшее развитие в работах его сотрудников: В.Н. Кондратьева, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, О.М. Толеса, А.С. Соколика и К.И. Щелкина. Процессы горения в двигателях изучали Д.Н. Вырубов, Н.В. Инюземцев, М.М. Масленников, Т.М. Мелькумов и многие другие. Большие работы по теории горения проведены А.С. Предводителевым, Л.Н. Хитриным, Е.С. Щетниковым и их учениками.

В условиях КС с повышенным давлением воспламенение связано не только с цепными процессами, но и с тепловым самоподогревом реакций. Источником разветвлений при окислении углеводородов являются относительно устойчивые продукты неполного окисления углеводородных радикалов – органические перекиси и альдегиды. Тепловое ускорение имеет место в завершающей стадии воспламенения, а основные стадии процесса имеют автокаталитический характер. Это объясняет наличие значительного периода индукции при газофазном окислении углеводородов, развивающемся по цепному механизму с вырожденными разветвлениями. Медленное окисление углеводородов сопровождается слабым свечением реагирующей смеси в виде распространяющегося холодного пламени. Причинами ускорения предпламенных реакций могут быть разветвления цепей (так называемый цепной взрыв) и прогрессивный саморазогрев реагирующей смеси (тепловой взрыв). Обычно оба фактора действуют совместно – в начальных стадиях процесса преобладает цепное самоускорение реакции, в последующих – тепловое, что дает так называемый цепочно-тепловой взрыв.

А.С. Соколик, рассматривая кинетическую гипотезу с пози-

ции цепных окислительных процессов, положил в основу следующие утверждения.

1. В области высоких температур с повышением давления температура воспламенения понижается.

2. При высоких температурах пламя возникает после непрерывного ускорения реакции и фактически сводится к взрыву СО, представляя собой одностадийный процесс. При низких температурах горячее пламя возникает после холодного пламени, и процесс воспламенения проходит в несколько стадий с образованием вначале холодного пламени по перекисной схеме, переходящего затем в голубое пламя с завершающим взрывом СО.

3. Одностадийное воспламенение, очень чувствительное к температуре, имеет точечный характер, многостадийное воспламенение – объемный.

4. В условиях дизеля (повышенное давление), в охлажденном топливном факеле, возможен низкотемпературный многостадийный механизм окисления, проявляющийся как цепное ускорение с вырожденными разветвлениями, создающими условия для теплового взрыва.

На рисунке 1.12 представлены границы областей воспламенения углеводородов: линия АБ – граница одностадийного воспламенения, линия БВГ – граница многостадийного воспламенения. Заштрихованная область определяет границы холодного пламени без воспламенения, а штриховая линия 1 – 2 – границу раздела между одно- и многостадийным воспламенением, указывающую на расширение области многостадийного окисления с ростом давления [381].

Распространение пламени осуществляется без внешнего воздействия на систему. Очередные слои или объемы горючей смеси воспламеняются за счет энергии, выделяющейся при сгорании предшествующих слоев той же смеси.

В отличие от этого для воспламенения необходим подвод энергии извне, например, нагревание горючей смеси адиабатическим или ударным сжатием. При самовоспламенении система «горючее-окислитель» находится в таких условиях, при которых по всей массе смеси или в отдельных ее частях относительно большого объема начинается развитие самоускоряющихся химических реакций, завершающихся возникновением пламени [52].

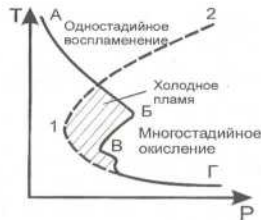


Рисунок 1.12 - Характеристики воспламенения углеводородных смесей

По имеющимся данным для метана максимальная скорость распространения пламени в воздухе при атмосферных условиях [169]:  $u_{\text{н}} = 33,8$  см/с, при содержании топлива в смеси 9,96 %.

В цилиндре газодизеля влияние на  $u_{\text{н}}$  давления и температуры при горении  $\text{CH}_4$  очень сложное, причем последнее влияет более значительно. Так, по данным Л.Н. Хигриона [433] для МВС максимальное значение  $u_{\text{н}}$  изменяется в 9,3 раза при возрастании температуры на 660 К.

Данные различных исследований свидетельствуют, что распространение фронта пламени метана по МВС требует больших энергетических затрат. Для распространения пламени в газодизеле характерны критические явления, когда в локальных объемах в определенных случаях незначительные изменения давления, температуры или концентрации способны резко изменить скорость протекания процесса. Это объясняется теорией пределов распространения пламени Я.Б. Зельдовича [253], исходя из зависимости температуры фронта от скорости его распространения при учете тепловых потерь. Известно, что от концентрации топлива в смеси и его теплотворности зависят верхний  $C_{\text{н}}$  и нижний  $C_{\text{н}}$  концентрационные пределы распространения пламени в том числе и в газодизеле с турбонаддувом. Метан является более легким, чем

воздух, и кривые его сгорания (скорость пламени в зависимости от концентрации метана) в МВС целиком лежат в тепловой области. Установлено, что для метана стехиометрический концентрационный предел распространения пламени в МВС составляет  $C_{\text{гн}} = 9,5\%$  и имеет граничные значения  $C_{\text{н}} = 5,0\%$ , а  $C_{\text{г}} = 15,0\%$ .

Вместе с тем необходимо учитывать тот факт, что влияние увеличения давления на верхний концентрационный предел распространения  $C_{\text{г}}$  пламени метана велико. Так, если при нормальных условиях для МВС стехиометрического состава  $C_{\text{н}} = 5,0\%$ ,  $C_{\text{г}} = 15,0\%$ , то при повышении давления до 40 МПа значение  $C_{\text{г}}$  возрастает до 46%. При этом концентрационные пределы распространения пламени в сложных горючих смесях  $C_{\text{г}}$  зависят от концентрации  $C_i$  компонентов.

Одним из условий протекания процесса горения МВС в цилиндре газодизеля является, помимо необходимого уровня энергии активации, возможность соударения реагирующих молекул. Это условие выполнимо лишь в случае хорошего перемешивания метана, углеводородного топлива и воздуха, то есть образования гомогенной смеси. В цилиндре газодизеля с турбонаддувом в объеме топливного факела будет иметь место турбулентный газовый поток, в котором наблюдается турбулентная или молекулярная диффузия. Однако и при турбулентной диффузии, приводящей к перемешиванию конечных объемов газа, процесс, идущий к перемешиванию конечных объемов газа, завершается только за счет молекулярной диффузии. При молекулярной диффузии и смешение газов определяется скоростью движения молекул и длиной их свободного пробега и оценивается коэффициентом молекулярной диффузии, который с увеличением температуры возрастает. Для метана  $\text{CH}_4$  значение коэффициента молекулярной диффузии при  $0^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении составляет  $0,196 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$  [56, 96, 264...266, 365]. Происходящая в цилиндре газодизеля турбулентная диффузия выражается в переносе молей газа в другую среду за счет турбулентных пульсаций, вследствие чего процесс перемешивания существенно интенсифицируется. В турбулентном потоке мгновенные значения локальных скоростей непрерывно меняются, а определяющей величиной будет средняя квадратичная величина пульсационной скорости и средняя длина

пути смешения, которую проходит элементарный объем газа по отношению к остальному газу, прежде чем он потеряет свою скорость и очертание [68, 169, 295]. Интенсивность турбулентной диффузии неизмеримо выше, чем молекулярной, поскольку масштаб турбулентности в десятки тысяч раз больше длины пробега молекулы. Таким образом, в метановоздушном расслоенном топливном заряде турбулентный диффузионный поток ускоряет кинетические процессы переноса промежуточных продуктов низкотемпературного окисления метана, и их активные центры инициируют процессы воспламенения метанотопливовоздушной среды в менее подготовленных локальных объемах.

При анализе рабочих процессов, протекающих в цилиндре дизеля с турбонаддувом, работающего по газодизельному циклу, следует исходить из того, что общими чертами внутрицилиндровых течений МВС являются нестационарность, турбулентность, трехмерность, синхронизация крупномасштабных течений с фазами цикла, цикловые вариации локальных характеристик и близость временных масштабов средних и турбулентных составляющих.

В цилиндре дизеля поступает гомогенный заряд МВС, который при горении, очевидно, будет иметь структуру турбулентного пламени с двумя предельными режимами: бесконечно быстрых (относительно временных масштабов турбулентности) химических реакций и объемного горения, при котором реагирование происходит в распределенных зонах. Вероятно, оба режима должны приниматься во внимание, хотя один из них может доминировать, в зависимости от частоты вращения п.

Доминирующим типом течения в цилиндре газодизеля является твердотельное вращение, хорошо сохраняющее энергию движения. При этом генерация турбулентности происходит, в основном, вблизи стенок цилиндра в противоположность распространяемым представлениям об интенсификации турбулентности за счет закрутки, усиление закрутки при впуске может даже подавлять турбулентность на фоне твердотельного вращения. Влияние закрутки на продолжительность процесса сгорания, приписываемое действию турбулентности, скорее, обусловлено растяжением фронта и связанной с этим интенсификацией смешения. Момент импульса вращения заряда падает и период от за-

крытия впускного клапана до в.м.т. на 30...50 %, в зависимости от структуры вихревого поля.

Во впускной системе газодизеля МВС, проходя через клапаны, может порождать кувыркающиеся вихри, сохраняющиеся до периода максимального возрастания напряжений сжатия (~30° п.к.в. до в.м.т.). При уменьшении высоты надпоршневого объема во время сжатия вращение большого кувыркающегося вихря ускоряется и генерирует турбулентность, за счет чего общий уровень турбулизации заметно возрастает, соответственно возрастает и скорость распространения пламени. Интенсификация турбулентности и закрутки способствует КС в поршне, которая в значительной мере определяет характер течения.

При приближении поршня к в.м.т. возникает радиальное движение газа в надпоршневой полости к оси цилиндра, называемое вытеснительным течением (рис. 1.13).

Оно порождает новые движения в аксиальной плоскости с последующей турбулизацией и деформирует профиль скоростей закрутки, что приводит к перераспределению углового момента. Скорость вытеснения зависит от минимальной высоты надпоршневого зазора и площади вытеснения, определяемой диаметром горловины КС в поршне. На нее также оказывают влияние утечки через поршневые кольца, объем кольцевых полостей между поршнем и цилиндром и потери тепла в головке цилиндра. Взаимодействие вращательного и вытеснительного течений в КС в поршне приводит к неоднородности газодинамического поля вдоль оси КС, аналогичной осевой неоднородности закрутки в цилиндре в конце такта впуска.

При закрутке вытеснительное течение нарушает твердотельный характер движения заряда, турбулентность активно диффундирует от кромок выемки в поршне к ее центру, и поэтому обеспечиваются оптимальные условия быстрого смешения вырскиваемого топлива с МВС. В итоге, эффективность рабочего процесса дизеля возрастает, а дымность ОГ снижается.

Интегральный масштаб турбулентности вблизи в.м.т. пропорционален высоте надпоршневого зазора. Масштабы турбулентности уменьшаются с ростом частоты вращения п.

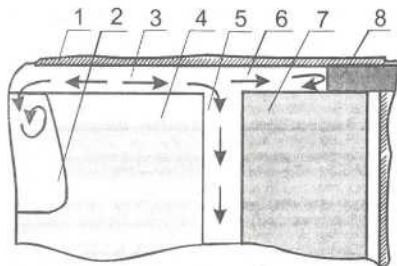


Рисунок 1.13 - Схема генерации вихрей МВС при подходе поршня к в.м.т. в цилиндре газодизеля с турбонаддувом.

1 - головка штифта; 2 - КС типа ШВИДИ; 3 - надпоршневой зазор; 4 - поршень; 5 - щелевое цилиндрическое пространство; 6 - плоское щелевое пространство; 7 - цилиндр; 8 - прокладка стыка головки с цилиндром

В КС типа ЦИДИ турбулентность МВС неоднородна и может быть охарактеризована в разных областях цилиндра различными константами. Суммарная энергия вихрей, влияющих на турбулизацию МВС, соизмерима с другими механическими компонентами энергетического баланса смесеобразования. Существенной является синхронность максимальной интенсивности вихрей с подходом концевых частей топливных факелов. Дробление и испарение последних интенсифицируется встречей с данной совокупностью вихрей.

В дизеле с КС типа ЦИДИ запальный факел ДТ воздействует на метановоздушный заряд, увлекая его за собой, а испарившееся топливо под влиянием закрутки переносится вдоль факела. Последующий процесс сгорания может определяться скоростью испарения или смешения, которые, в свою очередь, зависят

от характеристик выпрыскивания и распределения скоростей вращения воздушного заряда.

Конический факел запального топлива характеризуется в области вблизи форсунки наличием жидкого ядра, где скорость и плотность капельной фазы высоки, и углом конуса струи, который определяется параметрами форсунки и отношением плотностей газа и жидкости.

Начало дробления определяется как динамикой соплового течения, так и аэродинамическим взаимодействием выпрыскиваемой жидкости с окружающим газом. Первый из этих механизмов связан с неоднородностями полей скорости и направления движения топлива в плоскости выходного сечения сопла, кавитацией, осцилляциями давления подачи топлива и отрывом течения. Второй механизм дробления связан с неустойчивостью поверхностных волн, ведущей к распаду жидкой струи.

Низке по течению факела существенную роль в эволюции струи играют турбулентное смешение и вовлечение воздуха в факел, в то же время пространственное распределение капель зависит от их размера и существует корреляция между средней скоростью и средним размером капель.

При многофакельной системе выпрыскивания улучшается распределение топлива и увеличивается скорость испарения капель в верхней периферийной части КС в поршне, где скорость закрутки выше и где происходит интенсивная генерация турбулентности вытеснительным течением. Процесс сгорания начинается в зонах между струями, где концентрация паров выше, и на границах топливных струй, где условия наиболее благоприятны для дробления капель.

В отсутствие направленных течений в окрестности топливного факела возникает очаг воспламенения, распространяющийся со скоростью ламинарного пламени. Локальные характеристики турбулентности могут влиять на направление распространения, причем в бедных смесях локальные эффекты могут вызывать гашение пламени. В течение начальной фазы, коррелирующей с цикловыми вариациями  $p_{\text{с}}$ , основными факторами являются газодинамика и характеристики факела. Позже распространение пламени становится независимым от параметров топливного факела, но остается чувствительным к окружающему полю течения. В

этой переходной второй фазе скорость пламени достигает значений, намного превышающих ламинарные благодаря увеличению площади фронта пламени. Темп превращения гладкой поверхности очага в сильно искривленную поверхность определяется масштабом и интенсивностью турбулентности несгоревшей смеси, а также сдвиговым действием среднего течения, если таковое имеет место. При дальнейшем увеличении площади фронта распространение пламени переходит в третью фазу полного развития, когда скорость выгорания становится стационарной.

По достижении фронтом наиболее удаленной твердой границы его распространение прекращается, и происходит догорание смеси, охлажденной пламенем (четвертая фаза). В большинстве случаев скорость турбулентного горения сопоставляется с интенсивностью турбулентности перед воспламенением, однако возможны случаи, когда интенсивности турбулентности перед фронтом в зоне реагирования и в продуктах сгорания отличаются от соответствующей величины перед воспламенением. Цикловые вариации могут быть связаны с влиянием поля турбулентности и неоднородности состава смеси в окрестности топливного факела в момент воспламенения.

Развитие очага воспламенения усиливает влияние турбулентных пульсаций и приводит, в отсутствие сильных средних течений, к вариациям процесса сгорания. При наличии закрутки с характерной для нее прещесней центра вращения заряда в области резких градиентов скорости возможны также цикловые вариации течения, влияющие на процесс сгорания через растяжение пламени. К моменту достижения струей стенки первая фаза сгорания завершается, и начинается распространение пламени в зонах попадания топлива на стенки.

Зоны воспламенения и распространения пламени в пристеночной области определяются динамикой выпрыскивания, и это позволяет контролировать процессы, ведущие к дывлению. При опускании поршня заряд из выемки в нем перетекает обратно в надпоршневой объект, и это течение, обратное вытеснительному, вновь генерирует турбулентность вблизи кромки горловины. За счет этого стимулируется процесс смешения на последней критической стадии горения, когда выпрыскивания нет, а скорость закрутки заряда снижена.

### 1.6. Образование оксидов азота при сгорании природного газа и дизельного топлива в дизелях с турбонаддувом

Оксид азота NO образуется во время горения в КС в различных концентрациях. Цепные реакции начинаются с появления атомарного кислорода, который образуется вследствие диссоциации молекул кислорода при высоких температурах, достигаемых в процессе горения [295, 343, 470]. В соответствии с этим механизмом атомы азота не начинают цепной реакции, так как их равновесная концентрация во время горения относительно низка по сравнению с равновесной концентрацией атомарного кислорода. Поэтому при горении в цилиндре дизеля локальное образование NO в струе связано с локальной концентрацией атомов кислорода. Оно зависит от концентрации кислорода и локальной температуры.

В дизелях во время такта сжатия NO не образуется даже в двигателях с очень высоким наддувом из-за относительно низкой достигаемой температуры [24, 53]. Хотя NO не образуется в зонах срыва бедного пламени на ранних стадиях горения, повышение температуры воздуха может вызвать горение в этих зонах и образование NO происходит позднее в цикле работы, после того как сгорит остальная часть струи.

Скорость образования NO больше в пламени богатых смесей, чем в стехиометрических или бедных [245]. Однако окончательная концентрация максимальна для смесей, которые несколько беднее стехиометрической. Зоны горения бедной смеси являются одними из главных зон образования NO, поскольку эта часть струи сгорает первой и имеет наибольшее время пребывания в послепламенной зоне.

Повышение температуры вследствие горения в ядре и на стенках может увеличивать образование NO двумя путями. Во-первых, увеличение средней температуры в цилиндре, приводящее к повышению концентрации NO в зонах горения бедной смеси и срыва бедного пламени, а также в оставшемся воздухе. Во-вторых, это может привести к очень высокой температуре пламени в ядре. Количество NO, образующегося в ядре, зависит от локальной концентрации кислорода. Например, если концентрация кислорода в ядре увеличивается, как при подаче топлива через

большее число отверстий распылителя, количество NO, образовавшихся в ядре, увеличивается [320].

При снижении температуры газов в пристеночных слоях во время такта расширения концентрация NO не успевает снижаться пропорционально температуре. Как установлено, в поршневых двигателях процесс разложения NO в такте расширения очень медленный, поэтому концентрация NO в этом такте, по существу, не меняется [119]. В наибольшей степени это относится к горению бедных смесей [186]. Поэтому увеличение отношения топлива – воздух приводит к увеличению максимальной среднеобъемной температуры газа, о чем свидетельствует повышение максимального давления и температуры ОГ. Увеличение максимальной среднеобъемной температуры газа не сопровождается соответствующим увеличением количества NO. Этим подтверждается тот факт, что эмиссия NO двигателями с непересредненным впрыском и турбонаддувом главным образом связана с горением в зонах бедной смеси; кроме того, концентрация NO, обусловленная последующим горением топлива в ядре и на стенках, может и не быть основным источником образования NO.

К настоящему времени приближенно до детальной разработки процесса можно отметить 4 основные группы источников образования оксидов азота в продуктах сгорания углеводородных топлив при горении. Поскольку источники и механизмы этих процессов различны, рассмотрим каждый из них в отдельности.

#### 1.6.1. Образование «термических» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

Сложность при изучении горения топливозоудушной смеси в КС дизеля заключается в том, что продукты сгорания природного газа и ДТ включают в себя довольно много разнообразных веществ. Если сначала удавалось обнаружить только конечные продукты сгорания, то сегодня с помощью современных методов анализа можно выявить промежуточные соединения, свидетельствующие о том, что горение – это сложная система молекулярных реакций [367].

С научной точки зрения цель состоит в том, чтобы узнать,

какие элементарные реакции способствуют увеличению и какое – уменьшению содержания токсичных компонентов в продуктах горения. Наиболее понятным процессом возникновения ВВ при горении является образование оксидов азота с общей формулой  $\text{NO}_x$  в очень горячих пламенах (при температурах более 2000 К). Считается, что единственным оксидом азота, образующимся непосредственно в пламенах, является NO. Дюоксид азота  $\text{NO}_2$  появляется позже в результате медленной реакции оксида азота NO с атмосферным кислородом, которая может идти даже при комнатной температуре [283].

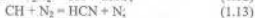
В очень горячих пламенах молекулярный азот воздуха теряет свою инертность и расщепляется атомами кислорода по реакции



Атомы азота быстро взаимодействуют с молекулярным кислородом с образованием оксида азота и атомарного кислорода:



Какой промежуточный продукт имеет достаточную энергию и присутствует в достаточном количестве, чтобы расщепить молекулу азота, пока не выяснено. Предполагают, что это радикал CH, участвующий в следующей цепочке реакций:



Условия образования оксидов азота при горении до сих пор не разработаны в достаточной мере и требуют глубокой проработки весьма сложной химической кинетики процесса в сочетании с детальным изучением теплообмена и его влияния на кинетику [283]. В большинстве публикаций в качестве основной модели образования NO принималась «термическая» схема. Согласно этой схеме выход NO определяется реакцией между атомом кислорода и молекулой азота. При этом количество атомар-

ного кислорода определяется диссоциацией молекулы  $\text{O}_2$ . В условиях высокотемпературного горения азот воздуха переходит в реакционноспособное состояние и соединяется с кислородом, образуя оксиды NO,  $\text{NO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Основная доля при этом приходится на NO [48].

Энергетический барьер этой реакции складывается из двух составляющих:

а) энергии, требующейся на образование одного атома кислорода ( $E_1$ );

б) энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота ( $E_2$ ).

Таким образом,

$$E = E_1 + E_2 = 494/2 + 314 = 561 \text{ кДж/моль}. \quad (1.15)$$

Эти процессы имеют очень большой энергетический барьер и, следовательно, определяются температурой процесса.

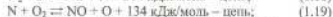
Так как энергия активации этой реакции очень высока, то она предопределяет исключительно сильную зависимость скорости образования оксидов азота от температуры:

$$dC_{\text{NO}}/dt = 2 K_{II} C_{\text{O}} C_{\text{N}_2}, \quad (1.16)$$

где  $K_{II}$  – константа скорости реакции, %;

$C_{\text{O}}$  и  $C_{\text{N}_2}$  – концентрации атомарного кислорода и молекулярного азота, % [466].

Образование атомарного кислорода в КС при горении происходит не только за счет диссоциации молекулы  $\text{O}_2$ , но и в ряде других реакций, концентрация атомарного кислорода в зоне горения на 1-2 порядка выше равновесного, определяемого из условий диссоциации молекулярного кислорода, и в пламенах углеводородов составляет около 0,4...0,8 %:



Условия протекания цепной реакции окисления атмосферного азота свободным кислородом при горении, формальная кинетика которых описывается уравнением



В работах Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, Ю. Райзера показано, что, несмотря на цепной механизм реакции образования оксидов азота, ее формальная кинетика достаточно хорошо описывается уравнением обратимой реакции (1.11) с энергией активации для прямой реакции  $E_1$  и обратной  $E_2$ . В результате получено уравнение для равновесного количества NO [38]:

$$[C_{\text{NO}}] = 4,6 \sqrt{C_{\text{O}_2} C_{\text{N}_2}} \exp\left[-21500/(RT)\right]. \quad (1.22)$$

Концентрация атомарного кислорода в пламенах может быть определена экспериментально с использованием спектральных методов или расчетным путем. Согласно расчетам Я.Б. Зельдовича, при горении с избытком окислителя

$$C_{\text{O}} = [K] \sqrt{C_{\text{O}_2}}, \quad (1.23)$$

где  $C_{\text{O}_2}$  – концентрация кислорода в продуктах сгорания, %;  $[K]$  – константа равновесия  $\text{с}^{-1}$ .

Так как значение  $[K]$  сильно зависит от температуры, то, следовательно, концентрация атомарного кислорода и зависящий от нее выход оксида азота обусловлены, в значительной степени, максимальной температурой в зоне горения.

Также стоит отметить, что концентрация оксидов азота линейно увеличивается с увеличением концентрации атомарного кислорода и экспоненциально с увеличением температуры [457]. Однако, согласно работам С.П. Феннмора, П.С. Мальте, зависимость выхода O и O<sub>2</sub> по формуле (1.23) не имеет места. По их мнению, при закипании бедных смесей NO образуется во влажном турбулизованном потоке через геммоксид азота N<sub>2</sub>O:



При стационарном режиме горения реакция горения и следующая за ней реакция образования оксида азота NO протекает при переменной температуре. При анализе процесса в работах Ю. Райзера за характерную температуру принята максимальная температура цикла [315].

П.Я. Садовниковым была разработана математическая теория синтеза азота в условиях переменной температуры. Получены решения для двух крайних случаев подвижности реакций:

а) малой подвижности, когда в зоне горения не успевает образовываться равновесная концентрация оксида азота и реакция останавливается при малом выходе вследствие охлаждения;

б) большой подвижности, когда в процессе горения достигается равновесная концентрация, но реакция остается подвижной, и далее при охлаждении концентрация оксида азота падает в результате его разложения.

Мерой подвижности реакции является безразмерный критерий, составленный из константы скорости обратной реакции –  $K_1$ , равновесной концентрации –  $[C_{\text{NO}}]_r$  и времени реакции –  $\tau_p$ :

$$K_1 [C_{\text{NO}}]_r \tau_p$$

В частности, при малой подвижности реакции, соответствующей значениям  $K_1 [C_{\text{NO}}]_r \tau_p < 1$ , безразмерный (отнесенный к равновесной концентрации) выход равен критерию подвижности:

$$C_{\text{NO}} = C_{\text{NO}}' [C_{\text{NO}}]_r = K_1 [C_{\text{NO}}]_r \tau_p. \quad (1.28)$$

Используя характерное время установления равновесной концентрации  $\tau_{\text{NO}}$ , приведенное Ю. Райзером, получим критерий подвижности реакции:

$$K_1 [C_{\text{NO}}]_r \tau_p = \tau_p / [C_{\text{NO}}]. \quad (1.29)$$



Вследствие значительного энергетического барьера реакции (1.15) можно считать, что образование основного количества оксида азота, определяющего концентрацию в конечных продуктах сгорания, происходит при максимальной температуре и остается существенным на некотором температурном интервале, так называемой температурной ступеньке. За данную величину целесообразно принять введенную Д.А. Франк-Каменецким единицу температуры, соответствующую изменению скорости реакции [425]:

$$RT_{max}^2 / E \sim \Delta T, \quad (1.30)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная.

В этом случае время реакции рассматривается как интервал  $\Delta t$ , в течение которого поддерживается температурная ступенька.

Наибольшее количество исследований выхода NO проведено при горении МВС. Многими исследователями предпринимались попытки дополнить рассмотренную выше теорию с целью увязки с экспериментальными данными, полученными при исследовании процессов горения.

Подробное рассмотрение позволило отметить следующее:

- 1) время пребывания реагентов в зоне максимальных температур в КС обычно ниже равновесного;
- 2) в пламени имеется сверхравновесная концентрация атомарного кислорода;
- 3) температура в ядре зоны горения существенно ниже теоретической из-за повышенного расхода теплоты на неравновесную диссоциацию и наличия теплообмена излучением и турбулентных пульсаций;
- 4) время реакции всегда меньше времени образования равновесной концентрации. Поэтому количество образовавшегося в зоне горения оксида азота всегда меньше равновесных значений.

При горении углеводородных пламен механизм образования «термических» NO отличается от цепного механизма Я.Б. Зельдовича. При горении МВС возможны некоторые виды реакций.

С.П. Фенимор [458] предположил, что в углеводородных пламенах велика вероятность столкновения радикалов CH с молекулами азота, а также при использовании реакции (1.32) воз-

можно возникновение радикала N:



Также возможен механизм окисления  $\text{N}_2$  через радикалы OH, требующие тройного столкновения [39]:



При расчете образования оксидов азота в КС дизеля используют не только цепной механизм Я.Б. Зельдовича, но и различные кинетические механизмы, которые учитывают другие реакции бимолекулярного механизма. В результате чего достигается совпадение опытных и расчетных концентраций оксида азота NO.

По проведенному анализу образования «термических» оксидов азота можно установить следующее.

1. Окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания.
2. Выход NO определяется максимальной температурой сгорания, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции (при отсутствии в топливе азота).
3. Окисление азота происходит по цепному механизму взаимодействия атомов и молекул азота и кислорода.
4. Выход NO зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания.
5. Неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания значительно влияет на выход NO.
6. При температурах ниже 2000 К образование NO происходит с участием активных центров, таких как CN, HCN, NH,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{C}_2$  и др.

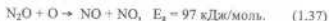
Выбор конкретной кинетической схемы протекания процесса определяется физическими условиями, видом топлива и составом смеси.

### 1.6.2. Образование оксидов азота из геммоксида азота в процессе горения углеводородных топлив

Механизм образования NO из  $N_2O$  аналогичен «термическому» механизму, в котором атом кислорода O реагирует с молекулой азота. Однако в присутствии третьей частицы M в этой реакции образуется молекула  $N_2O$ :



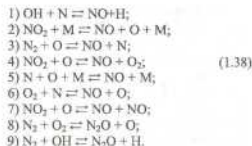
В работе П.С. Мальте и Д.Т. Пратта молекула  $N_2O$  может затем прореагировать с атомом кислорода O и образовать NO:



Очень часто эту реакцию не учитывают, поскольку она обычно дает незначительный вклад в полный выход NO. Однако в условиях бедной смеси образование радикалов CH может быть подавлено, и, следовательно, по механизму С.П. Фенимора образуется меньше NO, а высокие температуры подавляют образование NO по механизму Я.Б. Зельдовича. Остается только образование NO из  $N_2O$ , которое прототируется высоким давлением из-за тримолекулярной реакции и, как это обычно свойственно тримолекулярным реакциям, имеет низкую энергию активации. Поэтому низкие температуры не снижают его скорость так сильно, как в случае механизма Я.Б. Зельдовича. Все указанные обстоятельства приводят к тому, что путь образования NO через образование  $N_2O$  является существенным источником NO при горении бедных предварительно перемешанных смесей и в двигателях при использовании природного газа [43].

Однако в ряде исследований показано, что доля бимолекулярного механизма в общем процессе образования оксидов азота незначительна.

В работе [442] установлено, что в КС дизеля в зонах максимальных температур образуется только NO, а реакций с образованием  $NO_2$  практически нет и их можно не учитывать, а при тройном соударении частицей M может быть любая молекула, необходимая для отвода энергии:



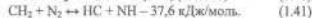
Итоговая концентрация NO на много порядков выше суммы концентрации всех азотосодержащих веществ.

### 1.6.3. Образование «быстрых» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

Для получения равновесных концентраций NO при горении стехиометрической МВС требуется период времени  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  с, однако время горения составляет  $10^{-4}$  с. Вместе с тем в углеводородных пламенах в отличие от пламен  $H_2$  и CO непосредственно в зоне горения обнаруживается достаточно высокие концентрации NO.

Наиболее вероятным механизмом образования «быстрых» NO является механизм С.П. Фенимора с участием углеводородных радикалов.

С.П. Фенимор на основании анализа ряда реакций сделал предположение, что быстрое образование NO объясняется связыванием молекул азота радикалами CH и  $C_2$  в реакциях с очень малыми энергетическими затратами:

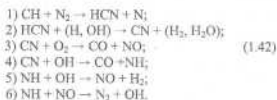


Следует отметить, что измерения в зонах факела концентрации HCN подтверждают возможность образования некоторого количества NO с участием данных реакций [471].

Исследования, проведенные Ю.Б. Хомером и М.М. Саттоном [368] при горении бедных метановоздушных пламен, показали, что при расчетном выходе NO (3...5 ppm) фактический выход NO пламени составляет 40...50 ppm.

В работах Ф. Бахмайера, Т. Минчи и др. также отмечались высокие концентрации HCN в пламенах. В результате работы было показано, что решающую роль в окислении  $N_2$  в зоне горения играет радикал  $CH_2$ , а в исследованиях [82] было установлено, что количественный выход NO при горении углеводородных газов (метан, пропан, бутан) пропорционален количеству CH независимо от значений  $\alpha$ . Образующиеся по этому механизму оксиды азота обнаруживаются в начале зоны горения ламинарных пламен (или в корне турбулентного факела), что свидетельствует о малом времени их образования. В связи с этим их и называют «быстрыми» NO.

В работе Р. Гарриса и соавторов при горении смеси  $CH_4 - O_2 - N_2$  (при изменении концентрации кислорода от 33,3 до 80 %) вблизи зоны горения неизменно фиксировались сверхравновесные концентрации OH. Для объяснения образования NO в зоне горения авторами предложена следующая схема:



Дополнительный механизм быстрого образования NO во фронте пламени более сложный, чем механизм термического образования NO, поскольку в нем участвуют радикалы CH, которые ранее рассматривались как несущественный промежуточный компонент, т.е. NO образуется по сложной схеме реакций. Радикалы CH, образующиеся как промежуточные компоненты только во фронте пламени, реагируют с азотом воздуха с образованием циановодородной кислоты, которая далее реагирует с образованием NO [229].

В работах В.П. Крыжановского и И.Я. Сигала проведены

исследования образования NO в предварительно подготовленных метановоздушных пламенах при различных  $\alpha$ . Было определено, что время образования оксидов азота в начале зоны горения мало, и эта часть образовавшегося NO с должным основанием причислена к «быстрым» оксидам азота.

В исследовании [370] экспериментально была определена скорость образования «быстрых» и «термических» NO во фронте ламинарного пламени. Для оксидов азота, образующихся по «термическому» механизму, средняя скорость образования для смеси  $T_0 = 293$  К,  $\alpha = 1,10$  составляла:

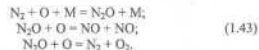
$$W_{\text{терм}} = (17 - 22) \cdot 10^3 \tau / (m' \cdot c).$$

Для оксидов азота, образующихся по «быстрому» механизму, среднее значение для этой же смеси составит:

$$W_{\text{быстр}} = (10 - 35) \cdot 10^4 \tau / (m' \cdot c).$$

Как видно, скорость образования «быстрых» NO на порядок выше. При повышении температуры смеси от 293 до 543 К выход «термических» и «быстрых» NO трудно разграничить. Как среднее время образования оксидов азота, так и средняя скорость образования по глубине фронта горения изменяются незначительно. С увеличением температуры скорость образования «быстрых»  $NO_x$  не увеличивается, а даже снижается, что еще раз подтверждает данные о более высоком содержании O и OH в пламенах при сравнительно низких температурах горения [273].

Образование «быстрых» NO можно представить другой схемой [253]:



Предполагается, что при температурах меньше 2000 К образование NO из  $N_2O$  могло бы преувеличить эмиссию NO.

На рис 1.13 показано образование NO при горении метана в

реакторе смешения. Расчеты выполнены для чисто «термического» и полного механизмов (механизмов Я.Б. Зельдовича и С.П. Фенимора), так что разницу между концентрацией NO, образованной по «термическому» механизму, и полной концентрации NO можно отнести на счет механизма быстрого образования NO [43].

Также анализ работ, проведенных Н.А. Гуревичем, В.Г. Лякоровским, И.Я. Сигалом, позволяет отметить, что быстрое образование оксида азота во фронте пламени – явление, органически связанное с горением и присущее пламенам углеводородов и углеродсодержащих топлив. Быстрое окисление азота во фронте пламени является достоверным и надежно установленным фактом. Явление хорошо воспроизводится в лабораторных условиях независимо от разнообразия используемых для его наблюдения горелочных устройств и типов пламени.

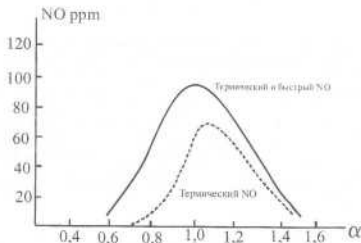


Рисунок 1.13 - Образование NO в реакторе смешения в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Наиболее характерными признаками быстрого окисления азота в углеводородных пламенах служат:

а) кратковременность процесса, в результате чего зона образования NO локализована на сравнительно небольшом участке фронта ламинарного пламени;

б) слабая зависимость выхода NO от температуры горения;

в) сильная зависимость выхода NO от соотношения топливо-воздух;

«Быстрые» оксиды азота образуются непосредственно во фронте ламинарного пламени, на участке, составляющем около 10 % ширины фронта пламени. Причем процесс образования начинается уже у передней границы фронта пламени в области температур около 2000 K.

#### 1.6.4. Образование «топливных» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

Работы различных ученых показали, что азотсодержащие соединения, входящие в состав топлива, также являются источником образования NO<sub>x</sub>, поступающих в атмосферу с продуктами сгорания.

«Топливные» NO<sub>x</sub> образуются из азотсодержащих соединений топлива при продувании его горячим воздухом уже при температуре 900...1000 K. Во всяком случае при температурах 1000...1400 K на начальном участке факела, где происходит воспламенение и горение летучих, обнаруживается значительный выход NO<sub>x</sub> [369].

Если бы все количество азота, содержащегося в топливе, окислялось до NO, то только за счет топливного азота могло бы образоваться при горении углей до 2...4 г/м<sup>3</sup>, при горении мазута до 0,5...1,0 г/м<sup>3</sup>. В действительных процессах лишь некоторая часть топливного азота переходит в оксиды азота. Азотсодержащие соединения в углях состоят из аминов, пептидов, аминокислот и др. При нагреве угля в корне факела в зоне выхода летучих обнаруживаются пиридины, хинолины и другие смолистые вещества, аммиак. Значительная часть азотсодержащих соединений переходит не в эти соединения, а в более прочные – нитриды и др. Поскольку для превращения топливного азота, входящего в такие соединения, как пиридины, хинолины, нитробензол,

нитроаммиа, аммиак и некоторые другие, а также на образование NO требуется меньшая энергия, чем энергия расщепления молекулы N<sub>2</sub>, образование существенных количеств NO даже при сравнительно невысоких температурах (1300...1400 °C) вполне возможно [238].

Некоторыми исследователями отмечается, что после возникновения азотистых соединений типа RN с ними протекают конкурирующие реакции, приводящие к образованию топливных NO<sub>x</sub>, либо N<sub>2</sub>, причем реакция (1.34) в восстановительной зоне (при недостатке окислителя) протекает быстрее, чем реакция (1.35):



Параллельно описанной выше одной из теорий проходили и другие исследования, в том числе на основании которых были сделаны следующие выводы:

1. Азотосодержащие соединения топлива при горении частично окисляются до NO, и влияние этого процесса на общее содержание NO, в продуктах сгорания должно быть учтено.
2. Образование «топливных» оксидов азота происходит на начальном участке факела, в области образования «быстрых» NO, и до образования «термических» NO.
3. Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO уменьшается с увеличением концентрации азота в топливе. Однако абсолютный выход NO при большем содержании азота топлива будет выше.
4. Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO быстро нарастает с увеличением коэффициента  $\alpha$ .
5. Выход «топливных» NO сравнительно слабо (по сравнению с «термическими» NO) зависит от температуры процесса.
6. Вид азотосодержащего соединения и содержание кислорода в топливе не оказывают влияния на выход «топливных» NO.

## 1.7. Физико-химические основы образования сажи в дизелях

При сжигании топлива в ДВС сажа является нежелательным продуктом горения. Для снижения содержания сажи в ОГ дизелей необходимо знать физические и химические основы процесса сажееобразования и выгорания сажи при сжигании углеводородных топлив. В различных областях науки о горении накоплен большой опыт изучения процесса образования сажи, хотя в некоторых процессах горения сажа является конечным целевым продуктом горения. Несмотря на это физико-химические основы процесса во многом схожи и могут быть объединены в единую теорию рассмотрения этого сложного многостадийного процесса.

Существует множество точек зрения на механизм образования сажи и выгорания в цилиндре дизелей, которые представлены в работах П.А. Теснера, В.М. Мальцева, А.Г. Гейдона, А.Д. Кокурина, В.И. Смайлса, С.А. Батурина, В.Г. Кнорре, М.В. Страдомского, В.В. Померанцева, У. Гардинера, Т. Танзави, В. Хайнеса, Ф.Г. Бакирова, В.А. Лиханова, А.С. Лоскутова, А.Л. Новоселова, В.А. Знонова, Н.Ф. Разлейцева, Ф.Г. Бакирова, Р.М. Петриченко, В.Н. Ложкина, В.А. Вагнера, В.В. Макарова, И.Л. Варшавского, В.З. Махова, В.И. Крутого, Н.А. Баранова, Л.Н. Хитрина, Я.Б. Зельдонича, Д.А. Франк-Камменского, Н.В. Лаврова, О.И. Смита и др. [14, 18...26, 152, 165, 203, 204, 285, 231, 385...399, 402...406, 408...411, 481 и др.].

Внутреннее смесеобразование и импульсное диффузионное сгорание предварительно неперемешанной неоднородной топливно-воздушной смеси в цилиндре дизеля всегда сопровождается выделением твердого углерода в виде сажевых частиц, которое определяет дымность ОГ дизеля.

Основная причина интенсивного сажеевыделения при диффузионном сгорании неоднородной смеси в КС дизеля заключается в существовании локальных физических условий для протекания реакций пиролиза углеводородов топлива. В процессе турбулентного диффузионного сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом идет одновременно образование и частичное выгорание сажевых частиц по индивидуальным химико-физическим механизмам. Концентрация сажи в цилиндре двигателя к моменту от-

крытия выпускных клапанов однозначно определяет дымность ОГ (в предположении, что в выпускном трубопроводе выгорания сажи не происходит) [231].

### 1.7.1. Физико-химические свойства частиц сажи

Изучением физико-химических свойств сажи в разное время занимались многие исследователи [11, 25, 26, 34, 71, 75, 99, 127, 192, 203, 204, 210, 258, 260, 398, 405, 455, 482 и др.].

Даже небольшое содержание частиц сажи существенно усиливает тепловое излучение продуктов сгорания. Изучение процесса сажевыделения неразрывно связано с проблемой снижения дымности, токсичности ОГ и тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы и является основой для ее решения.

Структура частиц сажи. Биско и Уорреном на основании рентгеноструктурных исследований было введено представление о турбостратной структуре, согласно которому в качестве первичных частиц принимаются блоки из графитоподобных слоев, упакованных примерно параллельно и эквидистантно, но хаотически ориентированных относительно общей нормали к ним, или сажевые кристаллиты. Диаметр слоя 2,0...3,0 нм. Высота слоев порядка 1,2...2,0 нм. Р. Франклин, изучая рост кристаллитов графитирующихся и неграфитирующихся углеродов, указала на то, что углеродные слои кристаллитов соединены между собой поперечными связями, препятствующими их упорядочиванию в графитовую структуру при гомогенной графитизации. Касаточкиным было высказано предположение о том, что природа соединений, участвующих в образовании связей между слоями графитирующихся и неграфитирующихся углеродов, в гомогенных условиях неодинакова. Эти положения легли в основу кристаллитной модели строения углерода, предложенной в начале 50-х годов Р. Франклини и Касаточкиным. Сажевые кристаллиты являются зародышами сажи. Первичные сажевые частицы связаны между собой микрофибриллами.

Гофманн и Вильм нашли, что кристаллиты имеют высоту 1,3 нм и среднюю длину 2,1 нм.

Рентгеноструктурными исследованиями и с помощью элек-

тронных микроскопов с высокой разрешающей способностью установлено внутренняя структура частиц сажи. Сажевая частица состоит из отдельных сажевых зародышей, называемых кристаллитами. Размер сажевой частицы составляет 10...30 нм. Из данных по дифракции рентгеновских лучей следует, что каждая частица содержит  $10^3...10^4$  кристаллитов. Наименьший размер кристаллита равен 1,3×2,1 нм и он содержит 120...200 атомов углерода. Кристаллиты соединены случайным образом и образуют сферическую частицу. Более крупные и сложные образования являются, как правило, результатом коагуляции и агломерации первичных сажевых частиц [204, 405].

Кристаллит состоит из нескольких слоев атомов углерода, образующих смещенную (искаженную) гексагональную решетку и имеет прямоугольную форму и четкие границы. Искажение кристаллической решетки обусловлено присутствием остаточного водорода. Слои атомов углерода параллельны друг другу и расположены в характерном для графита порядке с расстоянием между атомами 0,142 нм. Расстояние между слоями 0,345...0,370 нм. Два близлежащих слоя образуют пластинку сажи. Кристаллит содержит 3...5 пластинок, состоящих из 44 атомов углерода [203]. Кристаллиты упаковываются в частицу, близкую по форме к сферической и имеющую около  $10^3$  кристаллитов [391].

Таким образом, сажевые частицы являются составными. Первичными частицами являются сажевые кристаллиты. Связывание кристаллитов продольными и поперечными связями приводит к образованию скелета сферических сажевых частиц и макроструктур.

По мнению авторов работы [391] агрегаты образуются путем столкновений между собой и с отдельными частицами в результате турбулентных флуктуаций скорости потока, транспортирующего частицы.

Поверхность частиц сажи изрезана большим количеством микротрещин и пор различной формы и размеров, т.е. обладает высокой степенью порозности. Причем внутренняя поверхность пор может быть больше внешней поверхности частицы сажи. Удельная поверхность частиц сажи зависит от условий и режимов горения и находится в пределах 60...120 м<sup>2</sup>/г, увеличиваясь

при росте начального давления и температуры. Наибольшее значение для дисперсности сажи имеет время процесса и соотношение скоростей образования зародышей и поверхностного роста частиц. Энергия активации процесса образования зародышей имеет большее значение, поэтому с повышением температуры дисперсность сажи растет [179].

**Химический состав частиц сажи.** Частицы сажи состоят на 92...95 % из углерода и 0,8 % водорода, остаток составляет кислород и зольные элементы. Плотность сажевых частиц зависит от содержания в них атомов водорода, структуры частиц и составляет (1,8...2,0) г/см<sup>3</sup>. Содержание водорода в сажевых частицах тоже может меняться и определяется атомным отношением C/H. Величина этого отношения изменяется от 3 до 15.

Имеются основания считать, что уменьшение относительного содержания водорода в сажевых частицах связано не столько с изменением химического состава сажевых образований, сколько с уменьшением их удельной поверхности и, следовательно, относительного количества адсорбированных на ней углеводородов [391].

На поверхности частиц сажи осажается значительное количество высокомолекулярных углеводородов, определяющих канцерогенную опасность сажи. Массовая доля адсорбируемых углеводородов может достигать 30 % массы частицы сажи [133].

**Электрический заряд сажевых частиц.** Сильная зависимость размеров образующихся сажевых частиц от знака электрических зарядов, проходящих через пиролизную зону, скорости увода заряженных частиц из пиролизной зоны указывает на то, что начальные стадии образования сажевых частиц весьма чувствительны к присутствию в зоне образования сажи электрических зарядов.

Из измеренных подвижностей заряженных сажевых частиц и их размеров была оценена величина заряда, приходящегося на частицу. Найденный заряд как положительно, так и отрицательно заряженных сажевых частиц равен одному элементарному заряду. Сажевые частицы в пламени заряжены положительно [200, 404]. Заряд частиц препятствует их агломерации.

**Влияние сажи на радиационное излучение пламени.** В КС дизеля при сжигании углеводородных топлив образуется све-

тящийся пламя, эмиссионные свойства которого определяют интенсивность лучистого теплообмена со стенками КС. Радиационная способность такого пламени кроме температуры зависит от концентрации сажевых частиц в объеме пламени и некоторых режимных параметров, характеризующих рабочий процесс. С изменением концентрации сажи в объеме пламени изменяется интегральная поглощательная способность пламени. С увеличением средней концентрации сажи в факеле возрастает интегральная степень черноты пламени.

Таким образом, интегральная поглощательная способность пламени в развитой зоне горения зависит от коэффициента избытка воздуха, концентрации сажевых частиц в объеме пламени. При этом средний уровень концентрации сажевых частиц в объеме пламени зависит не только от  $\alpha$ , но и от рода сжигаемого топлива [33, 36, 138, 173, 268, 269, 385...396 и др.].

**Температура частиц сажи.** Как показали исследования Р. Милликена [260], температура частиц сажи зависит от их размеров и мало отличается от температуры окружающих частиц газа. Так, для частиц сажи размером до 0,3 мкм эта разность не превышает 1 К. В работе [391] для оценки соотношения между температурой частиц сажи и газа было использовано уравнение теплового баланса, составленного для частиц. В результате было получено, что за счет теплообмена конвекцией почти вся выделяемая частицей энергия передается окружающему газу при превышении температуры сажи над температурой окружающего газа примерно на 1 К. Ранее к такому же выводу пришли А. Шап и М. Якоб, которые исследовали светящееся газовое пламя со средней температурой около 1900 К [138]. Это позволяет заключить, что температуру частиц сажи в температуру газа можно принять одинаковыми.

## 1.7.2. Теория образования твердой сажевой фазы из углеводородов топлива

**Теория пиролиза углеводородов.** Дэви, а затем Марчел и Бергто предположили, что образование углерода в пламени происходит благодаря термическому разложению углеводородов,

Они наблюдали, что при высокой температуре углеводороды распадались в основном на углерод и метан. Ацетилен, который очень эндотермичен, может распадаться при взрыве на углерод и водород. Таким образом, было сделано предположение, что углерод образуется при пиролизе углеводорода при прохождении его через зону подогрева.

**Конденсация  $C_2$  и атомного углерода.** Из спектроскопических данных известно, что в пламенах органических соединений присутствуют радикалы  $C_2$ , а также радикалы  $C_3$  и атомы углерода (линии при 247,8 нм). Можно предположить, что вначале происходит полная дегидрогенизация углеводородов с образованием  $C$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и т.д., вслед за которой происходит укрупнение этих частиц. Смит в 1940 г. высказал мысль, что углерод образуется благодаря полимеризации  $C_2$ . Однако теоретически выделение  $C_2$  из углеводорода должно быть сильно эндотермической реакцией, поэтому образование углерода через  $C_2$  маловероятно из-за очень большого потенциального барьера [286].

**Образование углерода из полициклических ароматических углеводородов.** Руммель и Вэ в 1941 г. предположили, что образованию углерода предшествует образование полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Размеры бензольного кольца почти такие же, как и расстояния между атомами в графитовой плоскости, а несколько соединенных бензольных колец представляют собой по сути дела зародыш графитового кристаллита. Таким образом, углерод может образоваться в результате перестройки кольцевой структуры ароматических соединений. Однако сплошной спектр поглощения, полученный при пиролизе некоторых соединений, не всегда подтверждает эту гипотезу [186, 187]. Полициклические ароматические соединения, возможно, принимают участие в образовании ядер углерода, но маловероятно, что вся сажа в пламени образуется таким образом.

**Теория полимеризации углеводородов.** Представление об образовании углерода через полимеризацию углеводородов изложено Гейденом в работах [61, 62]. При избытке горючего свободные радикалы инициируют цепные процессы полимеризации, ведущие к образованию высших углеводородов. В результате термического разложения (крекинга) последних и появляются твердый углерод и водород. Если кислород присутствует в доста-

точном количестве, он связывает эти радикалы, и они не могут вызвать заметной полимеризации.

В работе Паркера и Вольфгарда (1950 г.) предполагаются два механизма образования сажи: путем образования очень крупных и, возможно, неустойчивых молекул, которые могут графитизироваться, и путем увеличения концентрации углеводородов умеренно высокой молекулярной массы, вплоть до концентрации насыщенных паров, при которой они, конденсируясь, образуют туман, создающий ядра и капли, которые затем графитизируются. Наблюдения над природой сажи [150] показывают, что первый механизм маловероятен. Авторы работы [37] отвергают оба механизма на основании величины энергетического барьера и по другим соображениям. В работе [151] на основе анализа времени, необходимого для полимеризации, и природы образующейся сажи также делается вывод о том, что полимеризационный и капельный механизмы не способствуют в заметной степени образованию сажи.

**Образование углерода из CO.** Беренс в своих работах предполагает, что укрупнение зародышей и рост частиц углерода может происходить в соответствии с реакцией Будауара:



Образование ядер углерода по данной реакции маловероятно, так как связано с необходимостью образования газообразного углерода. Однако если зародыши углерода уже образовались, указанная реакция может протекать как поверхностная реакция, ведущая к росту частиц углерода. Таким ростом зародышей углерода можно объяснить, например, образование частиц светящегося углерода в области, расположенной несколько выше зоны реакции [67].

Существует точка зрения, что сажевые зародыши, из которых впоследствии формируются сажевые частицы, образуются в результате мономолекулярного распада молекул углеводородов (в основном ацетилена  $C_2H_2$ ). Далее считается, что реакции proceed по цепочкам





где  $A_0$  – ацетилен;

$A_n$  – активный центр;

$A_1$  – углерод  $C_2$ ;

$k$  – постоянная, характеризующая скорость соответствующей реакции.

Также отмечается, что источником сажевых зародышей могут быть положительно заряженные углеводородные соединения с молекулярной массой более 300...700 а.е. Этот вывод сделан на основании того, что максимум концентрации в ацетилен-кислородном пламени по результатам масс-спектрографического анализа совпадает с моментом появления в пламени сажевых зародышей [39].

#### Низкотемпературный фенильный механизм (НТФМ).

Наиболее полно этот механизм образования сажи разработан проф. А.Д. Кокуриным. Согласно ему, ароматические углеводороды, имеющие два ароматических кольца, могут либо конденсироваться в высокомолекулярные соединения (при  $T < 1000$  К), либо в результате разрушения ароматических колец образовывать ацетилен  $C_2H_2$  и радикалы  $C_2, C_2H$  (при  $T = 1000...1500$  К). Гранницей между этими областями является предельная температура стабильности бензольного кольца ароматических углеводородов. Экспериментально установлено, что при температурах меньше 1000 К после отрыва от ядра алкильных групп фенильные радикалы  $C_6H_5$  и бензольные кольца не разрываются, а конденсируются в полициклические соединения типа ди- и трифенила, а при  $T > 1000$  К происходит разрыв циклических ароматических структур.

Из справочной литературы известно, что в отличие от других углеводородов свободная энергия ацетилена с ростом температуры уменьшается. Это означает, что устойчивость ацетилена с повышением температуры растет. Поэтому при высоких температурах велика вероятность того, что все углеводороды могут разложиться до ацетилена.

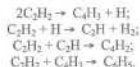
При повышенных температурах (до 1300 К) может происходить дегидрогенизация ацетилена с образованием радикалов  $C_2$  и  $C_2H$ . Взаимодействие ацетилена с полученными радикалами мо-

жет приводить к образованию зародышей сажевых частиц. Переход углерода из газовой фазы в твердую за счет образования новых связей сопровождается выделением значительного количества тепла.

А.Д. Кокуриным установлено, что в условиях получения ацетиленовой сажи одновременно с ней образуется некоторое количество ПАУ. Эти углеводороды получаются не как промежуточные продукты процесса сажеобразования, а образуются параллельно с ним за счет части ацетилена, непосредственно находящегося у относительно холодных стенок КС.

При охлаждении сажи полициклические углеводороды осаждаются и затвердевают на ее поверхности, но при нагревании значительная их часть не выделяется в виде летучих соединений, а коксируется на поверхности сажевых частиц. Подобный процесс, по мнению А.Д. Кокурина, является причиной образования вторичных структур сажи: алломеров, агрегатов, непеченных и др. структур. Как указывают многие исследователи, вторичные структуры легко разрушаются при механическом воздействии или нагревании, что косвенно подтверждает выдвинутое предположение.

При НТФМ химическим зародышем сажевой частицы является углеродный радикал  $C_6H_5$  – фенил, который из ацетилена получается в ряде следующих последовательно – параллельных реакций:



Исследованиями А.Д. Кокурина и Р.З. Магарила [239] было установлено, что при  $T \leq 1000$  К ароматические углеводороды бензольного ряда и полициклические углеводороды дизельного топлива при крекинге дают фенильные радикалы  $C_6H_5$  и полициклические продукты типа дифенила и трифенила.

При температурах 1000...1500 К бензольные кольца разрываются с образованием ацетилена, который практически полностью расходуется на образование ПАУ, являющихся, в свою оче-

редь, строительными кирпичиками при низкотемпературном механизме образования сажи. В результате последующего уплотнения ароматической структуры полициклических соединений и отделения водорода в процессе присоединения фенильных радикалов образуется физический зародыш сажевой частицы. При быстром охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов (в том числе бенз(а)пирен) не успевает пройти все стадии процесса и осаждается на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи [26].

Для условий сгорания в дизелях НТФМ образования сажи имеет место в тех случаях, когда в КС или отдельных ее объемах создаются переобогащенные топливом зоны с благоприятным для крекинга уровнем температур ( $T < 1500$  К).

**Высокотемпературный ацетиленовый механизм (ВТАМ).** П.А. Теснер [408...411] рассматривает образование сажи при термическом разложении углеводородов как физико-химический процесс возникновения новой твердой фазы, подчиняющийся двум одновременно развивающимся стадиям; образованию зародышей новой фазы и их росту. Скорости этих процессов определяются главным образом степенью пересыщения системы (т.е. отношением давления пара конденсирующегося вещества к давлению его насыщенного пара над плоской поверхностью). Термодинамически наиболее трудной и требующей наибольшего пересыщения стадией является образование зародышей. Рост образовавшихся зародышей происходит быстро при меньшем пересыщении системы, сильным падением которого он всегда сопровождается. Скорость образования зародышей зависит от скорости пересыщения системы. Скорость процесса в целом и дисперсность получаемого вещества зависят от скорости образования зародышей и, следовательно, от степени пересыщения системы. В процессе сажеобразования пересыщение системы обусловлено повышением температуры. Таким образом, чем быстрее возрастает температура углеводорода, тем больше скорость образования зародышей и тем выше должна быть дисперсность получающейся сажи.

Основная идея ацетиленовой теории заключается в том, что в высокотемпературном пламени большая часть углеводородов сначала превращается в ацетилен, который в результате дегидро-

гензации с участием свободных радикалов распадается на углерод и водород. Принципиальная схема этого процесса, известная как схема Портера, имеет следующий вид:



Количественный выход ацетилена, т.е. степень превращения топлива, зависит от температуры и времени контакта. Дальнейшее превращение ацетилена в сажу будет также определяться температурными условиями процесса горения [16].

Процесс образования зародышей при термическом разложении углеводородов имеет более высокую энергию активации (100 ккал/моль), чем процесс роста сажевых частиц (78 ккал/моль). Этот факт находится в соответствии с двухстадийным механизмом образования сажи.

Теснером и Рафалькес было найдено, что существуют минимальные («пороговые») концентрации углеводорода при данной температуре, при которых образуются сажевые частицы. При меньших концентрациях углеводорода сажевых частиц не образуется.

Из исследованных углеводородов наименьшей пороговой концентрацией обладает бензол, а наибольшей – метан. Наличие так называемых «концентрационных порогов» свидетельствует о важной роли цепных процессов при образовании зародышей сажевых частиц.

Допуская существование всех механизмов одновременно в КС газодизеля, мы считаем, что определяющим массовый выход сажи в цилиндре газодизеля с турбонадувом является ВТАМ. Аргументами, на наш взгляд, в пользу этой гипотезы служат следующие экспериментальные факты [254].

1. Продолжительность роста концентрации сажи от начальной до максимальной составляет 4...5 мс. Очевидно, что такая высокая скорость накопления сажи в цилиндре возможна только в том случае, если время образования сажи значительно меньше времени пребывания капель топлива в зоне образования сажевых частиц. Этому условию удовлетворяет только ацетиленовый механизм образования сажевых частиц, по которому суммарное время образования сажи на 4 порядка меньше характерного вре-

мени процесса сгорания в газодизеле и составляет  $10^7$  с.

2. Максимальная температура пламени в цилиндре газодизеля (2500 К) значительно выше определяющей температуры низкотемпературного фенольного механизма (до 1500 К) и соответствует температуре разложения ацетилена при давлении более 3,0 МПа.

3. По данным академика Н.Н. Введенского, с ростом температуры энергия образования ацетилена уменьшается, а его устойчивость возрастает. Следовательно, при высоких температурах, характерных для процесса сгорания в цилиндре газодизеля, практически все углеводороды могут превратиться в ацетилен.

4. Форма, размеры, структура, химический состав и физические свойства дизельной сажи во многом совпадают с аналогичными показателями технологической ацетиленовой сажи.

На основании рассмотренных механизмов образования сажи в цилиндре дизеля можно выделить три основных пути образования первичных сажевых частиц.

При температурах менее 1000 К первичные частицы образуются из ядер высокомолекулярных и ароматических структур, конденсирующихся из жидкой фазы в первичные твердые частицы при достижении критических физических свойств. При низких температурах скорости реакций полимеризации превышают скорость процессов дегидроенизации, что приводит к образованию высокомолекулярных структур, при дальнейшей дегидроенизации которых происходит фазовый переход с образованием твердых частиц. Повышение температуры (до 1500 К) ведет к увеличению относительной скорости процесса дегидроенизации, атомы водорода способны терять уже более легкие углеводороды, процессы полимеризации приводят к образованию более мелких ядер – твердых радикалов, объединение которых приводит к образованию первичных частиц. При еще более высоких температурах (более 1500 К) высокомолекулярных углеводороды распадаются на более легкие и устойчивые: метан, ацетилен и т.п. В этих условиях преобладающую роль в процессе образования сажи приобретает теснеровский механизм газофазного преобразования углеводородов через ацетилен и его производные. После выделения твердой фазы процесс упорядочения структуры частиц идет под действием механизмов гомогенной и гетерогенной

графитизации.

После образования физических зародышей сажевых частиц происходит их поверхностный рост за счет разложения молекул ацетилена на поверхности частицы с захватом углеродных атомов:



Кроме этого, поверхностный рост может осуществляться за счет гибели на поверхности сажевой частицы активных радикалов  $C_2H$ ,  $C_4H_2$ ,  $C_4H$ ,  $C_6H_2$ ,  $C_6H$  и др.



Суммарная скорость гетерогенного процесса роста сажевой частицы определяется выражением

$$W = K_{C_{2H_2}} \cdot P_{C_{2H_2}} \cdot S,$$

где  $S$  – суммарная реакционная поверхность частиц,  $см^2$ ;

$P_{C_{2H_2}}$  – парциальное давление  $C_2H_2$ , Па;

$K_{C_{2H_2}}$  – кинетическая константа скорости реакции гетерогенного роста частиц сажи при пиролизе,  $г/(Па \cdot см^2 \cdot с)$ .

Значения кинетических констант скорости реакций гетерогенного роста частиц сажи при пиролизе индивидуальных углеводородов приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5 – Кинетические константы образования пироуглерода из индивидуальных углеводородов  $K = A \cdot \exp^{-E/RT}$

Углеводород	$T, ^\circ C$	$A$	$E, кДж/моль$
Метан	650-1300	$8,0 \cdot 10^3$	272,0
Этилен	500-700	$7,6 \cdot 10^3$	155,0
Пропилен	550-650	$4,0 \cdot 10^3$	151,0
Бутидиен	475-600	$7,5 \cdot 10^7$	142,0
Бензол	750-870	$3,0 \cdot 10^3$	230,0
Толуол	650-850	$9,9 \cdot 10^3$	243,0
Нафталин	750-850	$6,6 \cdot 10^3$	222,0
Антрацен	730-900	$19,4 \cdot 10^3$	218,0
Ацетилен	550-1100	$17,1 \cdot 10^7$	138,0

На основании ряда исследований, проведенных Ф.Г. Бакировым, В.М. Захаровым, И.З. Полещуком, З.Г. Шайхутдиновым, можно сделать некоторые выводы о влиянии параметров рабочего процесса на образование и выгорание сажи в цилиндре дизели [285 и др.].

**Влияние состава смеси.** Наличие даже небольших локальных зон с  $\alpha < 0,7$  оказывает существенное влияние на количество образующейся сажи. Так как в рассматриваемом дизеле топливо выпрыскивается непосредственно в КС, то такие зоны в цилиндре дизеля будут всегда. При диффузионном горении дизельного топлива верхний предел начала сажеобразования по составу смеси составляет, как было отмечено выше,  $\alpha = 0,7$  ( $C/O = 0,5$ ). Минимально допустимым с точки зрения наличия ОГ дизелей является значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha \approx 1,3$ , которое называют пределом дымления. Диапазон  $\alpha$ , в котором происходит наиболее интенсивное образование сажи, составляет  $0,33...0,7$  [200]. Повышение давления и снижение начальной температуры смеси ведет к смещению порога сажеобразования в направлении обеднения смеси.

**Влияние давления.** Экспериментальные данные показывают, что с повышением давления при  $\alpha = \text{const}$  выход сажи увеличивается. Это связано, по-видимому, с увеличением локальных концентраций реагирующих веществ и скорости химических реакций пиролиза топлива и реакций сажеобразования. Однако с увеличением давления также возрастает скорость диффузии.

**Влияние временного фактора.** Процесс образования сажи начинается через  $1,5...2,0$  мс после момента поступления топлива в КС, что свидетельствует о наличии периода задержки процесса сажеобразования, связанного с необходимостью протекания процессов пиролиза топлива и образования зародышей. С увеличением времени пребывания частиц в цилиндре результирующее содержание сажи снижается из-за преобладания процесса выгорания сажевых частиц.

**Влияние температуры процесса.** Повышение температуры пламени приводит к сдвигу порога сажеобразования в сторону более богатых смесей и увеличению выхода сажи. Ускоренное образование сажи отмечается при температурах в КС выше  $2050$  К, а ее максимальная концентрация – при температуре около

$2200$  К [87]. При более высоких температурах скорость окисления сажи начинает превышать скорость ее образования и количество сажи в ОГ уменьшается. При температуре более  $2400$  К концентрация сажи в КС очень незначительна [389]. Такое же влияние оказывает повышение начальной температуры смеси. Это свидетельствует о том, что порог сажеобразования не является стабильной характеристикой углеводородного топлива, а зависит в том числе и от температурных условий.

**Влияние вида топлива.** Вид топлива оказывает существенное влияние на интенсивность сажевыделения. По склонности к сажеобразованию углеводороды располагаются в следующем порядке [200]: ряд нафталина – бензолный ряд – диолефины и дициклические нафтыны – олефины и моноциклические нафтыны – алканы. Большое значение имеет структура молекул. Чем больше разветвление цепи, тем больше склонность к образованию сажи. При увеличении отношения Н/С склонность к сажеобразованию уменьшается, а порог сажеобразования смещается в сторону богатых смесей. Применение метана  $CH_4$  (алкана с отношением Н/С = 4) в качестве основной части топлива позволяет сделать вывод о существенном снижении сажесодержания в ОГ газодизеля [203].

**Влияние турбонадува.** Применение турбонадува в дизелях позволяет увеличить плотность воздуха, поступающего в цилиндры, и тем самым повысить содержание кислорода в КС. Это приводит к увеличению коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и, следовательно, интенсификации процесса выгорания сажевых частиц. Кроме этого, турбонадув повышает температуру впускного заряда и приводит к усилению вихреобразования в цилиндре двигателя. Это приводит к улучшению процессов испарения, смешивания и сгорания в дизеле, смесь становится более однородной. Повышение температуры  $T_0$  впускного воздуха может привести к увеличению максимальной концентрации сажи и одновременно к уменьшению ее количества в ОГ. Это объясняется тем, что рост  $T_0$  приводит к повышению температуры  $T_c$  в конце сжатия и максимальной температуры  $T_{z, \text{max}}$  цикла, что способствует образованию большого количества сажи на ранней стадии сгорания (т.е. приводит к росту максимальной концентрации сажи). Однако повышение температуры ОГ наряду с высоким ко-

эффицентом  $\alpha$  способствует окислению образовавшейся сажи в конце цикла и ее содержание в ОГ снижается [138]. Влияние турбулентных пульсаций скорости газового потока на процессы сажееобразования также является сложной задачей: повышение интенсивности турбулентных пульсаций должно, очевидно, способствовать увеличению эффективной скорости диффузии окислителя, что способствует уменьшению сажееобразования, но в то же время увеличивается и вероятность столкновения частиц между собой и, следовательно, образования новой частицы с меньшей удельной поверхностью и, соответственно, менее реакционно-способной [391]. Однако, как показывают экспериментальные исследования, турбулентность, создаваемая в процессе сгорания, приводит к повышению эффективности сгорания, увеличивая при этом использование кислорода [222, 330 и др.]. Указанные факторы способствуют снижению сажесодержания в ОГ дизелей с турбонадувом.

### 1.8. Модели образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля

Горение топлива в дизеле сопровождается интенсивным образованием и выгоранием сажевых частиц, что увеличивает тепловые потери и теплонапряженность двигателя. Сложность процесса горения и трудности регистрации локальных концентраций сажи являются причинами того, что закономерности, особенно кинетика сажееобразования в дизеле, еще недостаточно изучены.

Существует несколько моделей образования сажи в цилиндрах дизелей. В разное время закономерностями процесса образования сажи занимались Н.Ф. Разлейцев, В.Ф. Суворкин, Л.П. Гилзегдинов, С.А. Батурин, В.Г. Кнорре и другие ученые. Одним из путей рассмотрения этого сложного и нестационарного процесса является применение зонных моделей образования и выгорания сажи, согласно которым в цилиндре дизеля выделяется ряд зон, отличающихся по концентрации реагирующих веществ и температуре, в которых преобладают либо процессы образования, либо процессы выгорания сажевых частиц. Этот метод нашел широкое развитие и применение в работах, проводимых в

МГТУ им. Н.Э. Баумана, где на его основе проводят математическое моделирование процессов горения и образования токсичных компонентов в цилиндрах ДВС, ЦСТИ и в ряде зарубежных исследований [26, 124, 138, 467]. Однако крайне мало работ, посвященных вопросу образования и выгорания сажи в газодизелях.

Профессором В.А. Лихановым была предложена феноменологическая (зональная) модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 (Д-240) [200, 203, 205]. В этой модели при впрыскивании запальной порции ДТ в метановоздушную среду в КС выделяется 5 зон, которые оказывают наибольшее влияние на результирующее сажеевыделение газодизеля (см. рис. 1.15).

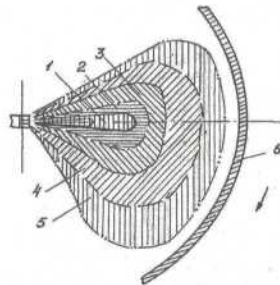


Рисунок 1.15 - Феноменологическая (зональная) модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля:

1 - зона образования сажи по ИТФМ; 2 - зона образования сажи по ВТАМ; 3 - зона генерации сажи с недостатком окислителя в МВС; 4 - зона генерации сажи с избытком окислителя в МВС; 5 - зона догорания обедненной МВС; 6 - стенка цилиндра

Первая зона (рис. 1.15) представляет собой ядро топливного факела, характеризующееся избытком углеводородного горючего и недостатком окислителя с температурным уровнем менее 1500 К. Здесь происходит генерация сажевых частиц по низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ).

Вторая зона (рис. 1.15) представляет собой оболочку топливного факела, которая имеет те же характеристики, что и первая, но температурный уровень выше 1500 К. Механизм образования сажи протекает здесь в основном по высокотемпературному ацетиленовому механизму (ВТАМ), по которому химически зародышами являются полиацетилены.

Третья зона (рис. 1.15) представляет собой зону генерации сажевых частиц в области цилиндра газодизеля с преимущественно МВС, где имеется недостаток окислителя и температурный уровень выше 1500 К. В этой зоне также преобладают реакции термического и окислительного пиролиза молекулы  $\text{CH}_4$  и ее радикалов с последующим образованием на последней стадии процесса атомов свободного углерода и его комплексов.

Четвертая зона (рис. 1.15) отличается от третьей избытком окислителя. В этой зоне достигается наиболее высокая температура. В таких условиях преобладающими являются реакции окисления  $\text{C}_2\text{H}_2$ , определяющие тепловой режим в цилиндре газодизеля. Одновременно взаимодействие с кислородом атомов углерода и его комплексов приводит к их разрушению с образованием диоксида углерода.

Пятая зона (рис. 1.15) представляет собой зону сгорания обедненной МВС (серыва бедного пламени), в которой завершаются все химические реакции и устанавливается равновесная концентрация продуктов полного сгорания.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре ЭЭ «Поршневые двигатели» профессором Л.В. Греховым и А.С. Кулешовым для расчета тепло- и массообмена, расчета содержания в продуктах сгорания оксидов азота и сажи используется зонная модель, основанная на выделении ряда зон, образующихся при развитии струи жидкого топлива (рис. 1.16).

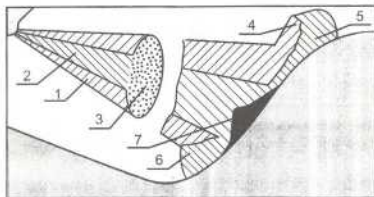


Рисунок 1.16 - Схема струи дизельного топлива

1 - оболочка струи; 2 - осевое ядро струи; 3 - передний фронт; 4 - пристеночный слой; 5 - начальное пятно; 6 - пристеночный поток; 7 - осевое ядро на стенке

Информация взята из работы А.С. Кулешова и Л.В. Грехова «Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливopодачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания».

При этом динамика развития топливной струи рассчитывается по уточненным зависимостям А.С. Лышевского. В процессе движения струи рассчитываются доли топлива, попавшего в характерные зоны, стенки КС, на зеркало и крышку цилиндра.

На основном участке развития свободной струи (рис. 1.16) выделяется ядро струи 2, оболочка 1 и средний фронт 3. При полете струи на стенку топливо, попавшее в передний фронт, постепенно переходит в пристеночную зону. При этом в пристеночном потоке, как и в свободной струе, выделяются 3 характерные зоны с осредненными показателями тепло- и массообмена. Это конусообразное осевое ядро на стенке 7, сформировавшееся при укладке на стенку фронта струи, пристеночный слой и разреженная оболочка над пристеночным слоем.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ С ТУРБОАДУВМ

### 2.1. Теоретические модели процессов смесеобразования и горения в цилиндре газодизеля с турбоадувом

#### 2.1.1. Зонная модель смесеобразования в цилиндре газодизеля с турбоадувом при вырскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку

Результаты проведенных нами исследований [224, 336] позволяют моделировать смесеобразование в цилиндре газодизеля с турбоадувом при вырскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку следующим образом.

При вырскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку в цилиндр газодизеля с турбоадувом происходит распад одиночных струй и совместное их взаимодействие в КС с образованием характерных зон с различной концентрацией углеводородного топлива и МВС.

Модель основывается на предположении, что струя топлива состоит условно из 6 областей (рис. 2.1). Кинетическая энергия первых жидких частиц расходуется на преодоление сопротивления МВС и МВВ, что проявляется в увлечении объемов примыкающих к каплям участков МВС и торможении частиц.

При этом на границе переобедненной зоны 6 МВС может приобретать скорость частиц менее обедненной зоны 5, а за счет вязкости и действия МВВ увлекаются и прилегающие слои свежей МВС 7.

При этом во фронтальных зонах 8 факелов начинается активное взаимодействие капель жидкого топлива с ядром соседней струи, со стенками КС и с МВС, включающее как силовое взаимодействие, выражающееся в торможении капель топлива, так и тепловое взаимодействие, приводящее к увеличению температуры капель. При вылете факела № II из сопла форсунки (рис. 2.1) образовавшиеся ядро факела и оболочка факела отклоняются под действием закрученного МВВ и часть топлива растекается по стенке КС. Другая часть, преимущественно зоны с обогащенной

и переобогащенной МВС, объединяется с зонами топливного факела № III, образуя зону 8.

Топливный факел № V также искривляется под действием турбулентно закрученного МВВ, оседает на стенке КС и сливается с факелом № I.

При этом образуется зона 8, в которой сосредоточена большая часть переобогащенной МВС и в которой происходит молекулярная диффузия метана на поверхности частиц углеводородного топлива. Данная область, в конечном итоге, будет являться самым мощным источником воспламенения МВС в КС и будет охватывать весь объем КС.

При вылете из сопла форсунки факел № IV, в свою очередь, также искривляется под действием МВВ и практически весь испаряется, не доходя до стенок КС с образованием наиболее обедненной концентрации углеводородного топлива в данной части КС. Во фронтальной зоне увеличение температуры капель достигается вследствие полного испарения головной частицы или столкновения последующих частиц с головной.

При этом обязательным условием является изменение режима движения частиц – они с огромной скоростью влетают в закрученную МВС, имеющую начальную температуру, что приводит к интенсивному теплообмену, молекулярной диффузии метана на поверхности частицы и торможению частиц.

Вместе с тем при торможении капли жидкого топлива нагреваются поскольку коэффициент теплообмена велик из-за значительных относительных скоростей и малого диаметра капли. В момент достижения капель температуры начала разгонки топлива -  $T_{ин}$  - начинается испарение топлива, и процесс диффузии метана на поверхности капли усиливается. Именно во фронтальной зоне факела происходит сложный процесс взаимодействия МВС и капель жидкого топлива в соответствии с представлениями о капельном теплообмене и взаимной диффузии, но с той особенностью, что режим выкипания определяется фракционной функцией топлива.

Возможно предположить, что при этом имеют место следующие особенности процесса парообразования топлива: пары срываются с быстролетящих капель, поэтому их отвод не лимитирует процесса парообразования.

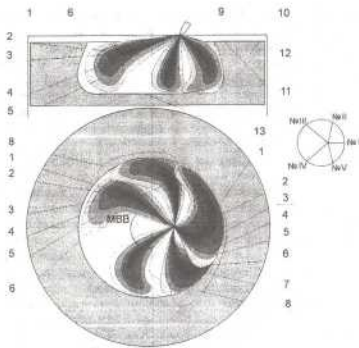


Рисунок 2.1 - Схема процесса смесеобразования топливных факелов при аэризации в МВС газодвигателя с турбонаддувом:

1 - ядро факела; 2 - оболочка факела; 3 - зона МВС, переобогащенная ДТ (МВС + мантия топливного факела); 4 - зона МВС, обогащенная ДТ; 5 - обедненная зона МВС; 6 - переобедненная зона МВС; 7 - зона свежей МВС; 8 - зоны совместного влияния соседних факелов; 9 - сопло форсунок; 10 - поршень; 11 - днище головки цилиндра; 12 - стенка цилиндра; 13 - камера сгорания в поршне; №I, №II, №III, №IV, №V - топливные факелы

При этом через некоторый промежуток времени после начала впрыскивания жидкого топлива в предварительно завихренную МВС в КС сформируются зоны: оболочка факела 2, зона МВС, переобогащенная ДТ 3, и зона МВС, обогащенная ДТ 4 (рис. 2.1).

В зоне переобогащенной МВС частицы топливного факела

движутся, сопровождаемые потоком МВС при незначительном тепло- и массообмене. Во фронтальной зоне факела частицы резко вступают в силовое и тепловое взаимодействие с завихренной МВС, поскольку встречаются с ее сопротивлением.

В результате капли топлива и сопровождающий их слой МВС начинают тормозиться, улекая за собой МВС, что характеризуется бурным нагревом частиц топлива из-за скачкообразного коэффициента теплообмена и градиента температур. По мере прогрева может наступить момент, когда тепловой поток ослабнет вследствие уменьшения перепада ( $T_0 - T_d$ ), но тем не менее после достижения температуры начала кипения наступает процесс фракционной разгонки капли, и нагрев остатков капель может происходить до  $T_0$ .

При вторжении частиц во фронтальную зону резко меняется характер процессов тепло-массообмена между частицами топлива и МВС, причем помимо подвода теплоты от свежей МВС может возникнуть теплообмен при коагуляции частиц и диффузии.

Необходимо отметить, что коагуляция частиц возможна при относительно невысоких температурах МВС, когда нагрев и испарение во фронтальной зоне происходит недостаточно интенсивно и торможение МВС лидирующих частиц позволяет настигнуть их последующим частицам со скоростью ( $W_{сп} - W_{др}$ ). Если средняя температура смещения выше начала разгонки топлива  $T_{кип}$ , то выкипают все легкие фракции с низкой температурой кипения, прибывшие с догоняющей частицей. Охлажденный от слияния жидкий комплекс нагревается от свежей МВС, снова затормаживается, в результате чего в него ударяется следующая частица жидкого топлива и цикл повторяется.

В процессе неоднократного повторения циклов замедления и ускорения жидких комплексов их средняя скорость постепенно падает, а температура повышается вследствие непрерывного подвода теплоты от свежей МВС.

Коагуляция частиц наблюдается на границе зон 3 и 4 вследствие изменения режима движения (торможения) лидирующих капель углеводородного топлива и уменьшения температуры прилегающей МВС. Коагуляция также происходит от слияния частиц соседних топливных факелов № I и № V из-за большой концентрации углеводородного топлива и из-за оседания на стен-



ках КС вследствие более низкой температуры поверхности КС и прилегающих слоев МВС.

Вместе с тем возможен случай испарения капель без коагуляции, когда тепловой поток велик и создаются условия для мгновенного испарения передней капли при торможении в МВС без слияния ее со следующей каплей.

В этом случае возникает тепловой микровзрыв капель и распад их на большое количество еще более мелких частиц, разлетающихся в разные стороны во фронтальной зоне. Каждая микрочастица, отлетая с большой скоростью, испаряется быстрее за счет увеличения поверхности раздела фаз.

Вместе с тем увеличение поверхности происходит из-за турбулентного движения МВС вследствие завихрения заряда. При этом ускоряется диффузия паров ДТ и МВС за счет гомогенизации в условиях увеличенной локальной турбулентности.

В КС находится зона с различной концентрацией топлива и МВС, что приводит к постоянной диффузии частиц. Необходимо учитывать, что пары топлива диффундируют с определенной скоростью, и время диффузии равно времени полусиспарения частиц топлива.

Принимая во внимание, что коэффициенты диффузии газа обратно пропорциональны молекулярной массе, для смеси, где присутствуют пары топлива, метан и воздух, в связи с тем, что молекулярная масса метана  $\mu_{\text{CH}_4} < \mu_{\text{в}}$ , суммарные коэффициенты диффузии и температуропроводности будут сильно изменяться с концентрацией горючего, что в последующем не может не сказаться на лимитировании скорости распространения пламени во МВС.

Рассмотренная зонная модель смесеобразования в цилиндре газодвигателя с турбонаддувом при впрыскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку чрезвычайно сложна, поэтому точное математическое описание затруднено, а при расчетах используются приближенные зависимости для отдельных характеристик топливного факела.

## 2.2. Уточненная математическая модель турбулентного горения МВС в цилиндре газодвигателя с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ

Очевидно, что процессы, предшествующие воспламенению в газодвигателях, трудно четко разделить на химические и физические, поскольку они тесно взаимосвязаны.

На основании работ Н.Н. Семенова и его школы, предложивших идею о цепном механизме окислительных реакций, А.С. Соколик разработал схемы одно- и многостадийного воспламенения углеводородных топлив в двигателях, дополнив их тепловым механизмом. Им выделены несколько основных стадий процесса с образованием промежуточных продуктов.

В метано-топливно-воздушных парах сразу после прохода фронтальной зоны начинаются цепные процессы окисления в условиях высоких температур, причем поскольку топлива (метана) в газообразном состоянии и в цилиндре, и в факеле находится больше, а кинетические процессы окисления развиваются только в газовой фазе, можно предположить, что они будут протекать значительно более интенсивно и, что более важно, в большем количестве локальных очагов. Поскольку процесс окисления углеводородов представляет сложную многозвенную цепную реакцию, в которую постепенно вовлекаются молекулы кислорода, а МВС сама по себе гомогенна и в условиях высоких температур и давлений может подвергаться низкотемпературному окислению еще до начала окисления жидких частиц ДТ, возможно предположение, что процесс воспламенения будет зарождаться там, где количество продуктов окисления метана достаточно для ускорения окисления жидких частиц, предположительно на границе участков 3 и 4 (рис. 2.1).

В метано-паровоздушном расщепленном заряде диффузионный поток ускоряет кинетический процесс за счет переноса промежуточных продуктов окисления из одного слоя в другие, ускоряя таким образом последующие акты окисления, охватывая локальные участки 1 и 2, где из-за недостаточного количества продуктов разложения метана процесс окисления жидких частиц задерживается. К моменту воспламенения большая часть МВС должна быть насыщена активными и промежуточными продук-

тами окисления, представлять собой крайне неустойчивую кинетическую систему, готовую в любое мгновение при любом микроримпульсе к воспламенению и быстрейшему завершению реакции окисления.

Без впрыскивания ДТ в цилиндр газодизеля низкооктановая МВС воспламениться не может, поскольку метан, имеющий компактную молекулу, требует для своего разрушения большую энергию активации. Но эта МВС, поданная через газозудный смеситель-дозатор во впускной трубопровод газодизеля, крайне гомогенна. Такая гомогенная смесь к моменту впрыскивания топлива, и особенно в момент впрыскивания топлива, претерпевает сложные физико-химические преобразования. Сюда относятся: подогрев заряда во впускном трубопроводе, что может привести к увеличению скорости элементарных актов цепи воспламенения ДТ за счет температурного ускорения хода реакций; перемешивание МВС с остаточными газами от предыдущего цикла, что приводит к увеличению скорости течения элементарных актов за счет введения в заряд активных частиц, не вступивших в окислительные реакции, протекавшие непосредственно в цилиндре; увеличение влияния повышающихся давлений и температур в цилиндре при осрединении поршня и, что особенно важно, низкотемпературное окисление метана в присутствии достаточного количества окислителя. Такая МВС с исходными и промежуточными продуктами взаимодействия компонентов в элементарных актах может служить промотором воспламенения ДТ при его впрыскивании в цилиндр газодизеля в качестве запального топлива.

То есть начальные, промежуточные и конечные продукты окисления метана промотируют предпламенные реакции ДТ, вызывая его воспламенение. В этом случае оно возможно и при локальных концентрациях ниже предельных по  $\alpha$ . Иными словами, метан обеспечивает воспламенение ДТ. Реальный процесс воспламенения сводится к предпламенному цепному реагированию топлива и окислителя, происходящему по общей схеме, но начинающемуся в локальных объемах в разное время с взаимодействием между собой в процессе турбулентной диффузии одинаковых исходных и различных промежуточных продуктов реакции. В КС газодизеля рабочий процесс будет иметь особенности, заключающиеся в наличии нескольких мощных очагов воспламе-

нения. Наиболее мощными источниками воспламенения при впрыскивании запальной порции ДТ через многосопловую форсунку будут зоны 8 (рис. 2.1) с наибольшей концентрационной неоднородностью жидкого углеводородного топлива и окислителя. Интенсивность реагирования и перенос продуктов окисления в данных зонах будут определять ускорение воспламенения и охват всей КС.

В двигателях с наддувом повышение плотности заряда может приводить к усилению влияния периферийного вихреобразования на протекание рабочего процесса. В цилиндре дизеля, работающего по газодизельному циклу, находится МВС, в которую впрыскивается запальная доза ДТ. При этом процесс горения идет по схеме горения каплей жидкого топлива, впрыскиваемого в МВС, несколько отличающейся от классической схемы диффузионного горения, так как в достаточно бедной части факела оказывается нереагирующая смесь воздуха и несгоревшего топлива. Указанная особенность возникает здесь как следствие самого способа организации процесса. В частности, при распылении жидкого топлива в потоке МВС из-за скольжения фаз часть несгоревших капель проникает в бедные области МВС. Другая причина состоит в том, что на ранних этапах из-за высокой интенсивности смешения химические реакции не успевают переработать все топливо, поэтому оно частично попадает в бедные области МВС.

Учитывая, что концентрационная неоднородность также будет иметь место, возможно выделить ряд зон в КС, где условия для горения МВС и ДТ будут существенно отличаться. Границы этих характерных зон носят условный характер, и при турбулентном движении можно говорить лишь об устойчивости средних по времени границ, мгновенные же значения скоростей и концентраций непрерывно меняются (рис. 2.2).

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

Зона 2 представляет собой зону, где содержится большое количество локальных объемов и где в метанотопливовоздушной

среде находится достаточное количество преобразованного и подготовленного к сгоранию вследствие испарения, коагуляции и теплового взрыва жидкого углеводородного топлива, подвергнутого, кроме всего, воздействию турбулентной и молекулярной диффузии. Количество этих продуктов в зоне 2 больше, чем содержание метана, хотя локальные их соотношения могут меняться в широких пределах.

Зона 3 характеризуется большим количеством локальных объемов, где испытывается недостаток окислителя, в большей степени присутствуют продукты испарения жидкого углеводородного топлива и где процесс быстрого молекулярного перемешивания в ходе турбулентной диффузии осуществляется раньше.

Зона 4 представляет собой зону преимущественно обогащенной топливно-воздушной смеси. Концентрация паров углеводородного топлива и МВС между зонами 1 и 5 распределена неравномерно, а локальные отношения и (топливо/воздух) могут меняться от 0 до бесконечности. В зонах 2, 3 и 4 в локальных участках возможно содержание топливно-воздушной смеси и более верхнего концентрационного предела воспламенения и менее нижнего предела воспламенения, но в зоне 4 находится большее количество таких локальных объемов, где присутствует избыток окислителя.

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

Зона 6 выделяется, так как в достаточно бедной части факела появляется не реагирующая смесь воздуха и негоревшего топлива.

В зоне 7 практически отсутствует горение углеводородного топлива, так как здесь в основном содержится высокотурбулентная смесь продуктов сгорания и свежей МВС.

Зона 8 является зоной горения и воспламенения МВС в цилиндре, закрученной движением МВВ, и обеспечивает воспламенение горючей смеси в менее богатых зонах КС.

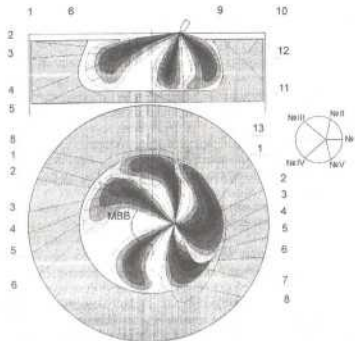


Рисунок 2.2 - Феноменология горения дизельного топлива, впрыскиваемого в МВС цилиндра газодизеля с турбонаддувом:

1 – зона горения ядра факела; 2 – зона горения оболочки факела; 3 – зона воспламенения и горения МВС; 4 – зона горения обогащенной топливно-воздушной смеси; 5 – зона догорания обедненной МВС; 6 – зона появления не реагирующей смеси воздуха и топлива; 7 – зона с преобладанием свежей МВС и продуктами горения; 8 – зона совместного влияния соседних факелов

Таким образом, практический интерес представляет изучение горения в потоке с сильно переменным составом при наличии непрореагировавшего топлива во всем факеле, т.е. горение частично перемешанных газов.

В настоящей работе предлагается подход, для обоснования которого остановимся на главных результатах, полученных в исследованиях [121, 171]. В работах показано, что внутри зоны ре-

акции уравнения переноса приводятся к виду

$$N \cdot \frac{d^2 c}{dz^2} + W_\alpha = 0, \quad (2.1)$$

где  $c_\alpha$  — концентрации реагирующих веществ;  
 $z = (Sc_f - c_\alpha + 1)/(1 + S)$  — восстановленная концентрация  
 горючего;

$c_f, c_o$  — концентрации горючего и окислителя;  
 $S$  — стехиометрический коэффициент;  
 $W_\alpha$  — скорость образования (гибели) вещества с номером  $\alpha$ ;  
 $N = D(\partial_j^2 / \partial x_j^2)$  — скалярная диссипация;  
 $D$  — коэффициент молекулярной диффузии;  
 $x_2$  — координата.

Предполагается, что учтены все следствия, вытекающие из законов подобия процессов тепло- и массопереноса и законов сохранения энергии и вещества, т.е.  $W_\alpha$  — функции  $z$  и  $c_\alpha$ . Скалярная диссипация характеризует скорость смешения вещества до молекулярного уровня. Ей можно придать также и другой смысл. Для диффузионного горения типична ситуация, в которой зона реакции расположена вблизи поверхности  $z = z_1 = 1/(1+S)$ , а связь между  $c_f$  и  $z$  носит кусочно-линейный характер. Поэтому поток топлива к зоне реакции выражается через  $N$  в следующем виде:

$$D \partial c_f / \partial n = \sqrt{ND},$$

где  $n$  — нормаль к зоне реакции.

Выражение (2.1) вытекает из уравнений переноса, если пренебречь нестационарным и конвективными слагаемыми и считать, что основную роль играет молекулярный перенос в направлении  $n$  (такой подход справедлив, если градиенты концентраций меняются в зоне реакции очень резко). Тогда при переходе от переменной  $n$  к переменной  $z$  и получается уравнение (2.1). Оценка, подтверждающие корректность указанной процедуры, приведены в работе [121], а один из примеров ее использования в практических целях, подтверждающий ее справедливость, содержится в

исследовании [171]. Из уравнения (2.1) видно, что решение определяется лишь одной характеристикой турбулентности — случайным параметром  $N$ , т.е. в зоне реакции распределение концентраций не зависит от предыстории процессов смешения и горения.

Поскольку в достаточно бедных смесях скорость реакции мала, то решения (2.1) — линейные функции  $z$ . Если  $z$  мало, то при увеличении  $z$  должны наблюдаться все более и более сильные отклонения от линейной зависимости. Так как скорость реакции сильно зависит от температуры, а температура связана с  $z$ , то такие отклонения должны носить «везиальный» характер. Другими словами, есть некоторая поверхность  $z = z_1(N)$  такая, что при  $z > z_1$  реакции существуют, а при  $z < z_1$  они не играют роли. Подробно этот подход описан на примере окисления CO. Далее используются качественные результаты работы, а именно предполагается, что: первое — в области  $z < z_1$  реакции не идут, второе — система (2.1) проинтегрирована, т.е. найдены зависимости концентраций всех веществ от  $z$  и  $N$  и зависимость  $z_1(N)$ , третье — функция  $z_1(N)$  слабо зависит от  $N$ .

В области  $z < z_1$  полученные зависимости несправедливы, так как здесь не выполняется условие пригодности системы (2.1) (резкое изменение градиентов концентраций типично лишь для зоны реакции). Таким образом, задача сводится к исследованию решения уравнения диффузии без источников для концентраций с какого-нибудь одного вещества (ДТ, МВС, какого-либо продукта неполного сгорания), которое далее для краткости называется горючим. Граничные условия заданы на искривленной, нестационарной поверхности  $z = z_1 = \text{const}$  в виде  $c_i = \phi(N)$ , где функция  $\phi$  находится в результате интегрирования уравнения (2.1).

Укажем сначала ряд упрощающих обстоятельств. При  $\phi = \text{const}$  поля  $c$  и  $z$  подобны, если на начальной стадии процесса в бедной части факела ( $z < z_1$ ) горючее отсутствовало, т.е.

$$c = \phi_z / z_1, \quad (2.2)$$

Эта формула приближенно справедлива и в ряде других случаев. Ясно, что  $\phi \rightarrow 0$  при  $N \rightarrow 0$  (поток горючего к зоне реакции уменьшается и процесс приближается к термодинамическому

равновесному).

По мере удаления от точки слияния потоков горючего и окислителя характерные значения  $N$  уменьшаются ( $z = \text{const}$  при полном смешении). Следовательно, горючее проникает в бедную часть факела в основном на ранних стадиях. Позже оно диффундирует из бедной части факела к зоне реакции, где и сгорает. Если перенос происходит достаточно быстро, то формула (2.2) приближенно справедлива. Таким образом, формула (2.2) описывает некоторое равновесное состояние, в котором предистория процесса не существенна.

Скорость достижения такого состояния прежде всего определяется знаком скорости среды  $v$  относительно поверхности  $z = z_1$ . Чтобы пояснить сказанное, рассмотрим простой пример - горение при смешении неограниченных потоков воздуха ( $z = 0$ ) и богатой МВС ( $z = z_0$ ). Варьирование параметра  $z_0$  позволит прояснить основные особенности проблемы. Кроме того, такая задача имеет и самостоятельное значение как некоторая идеализация процессов в зоне КС двигателя, где происходят смешение и горение при движении воздуха и ДТ в богатой топливовоздушной смеси. Рассматриваемый случай соответствует начальному участку процесса.

Вследствие перемежаемости горючего и окислителя имеется три области 1-3 (рис. 2.3), разделенные случайно колеблющимися границами  $F_1$  и  $F_2$ : 1 - бедная МВС, 2 - богатая топливовоздушная смесь. Течение в областях 1 и 2 потенциально. В области 3 (турбулентная жидкость в гидродинамическом смысле) течение завихрено, а концентрация случайно меняется между нулем и  $z_0$ . Поскольку обычно  $S \gg 1$ , то при  $z_0 = 1$  поверхность  $z = z_1$  расположена вблизи границы  $F_1$  (бедная область), а при малых  $z_0$  - около границы  $F_2$  (богатая область).

В этих предельных случаях нормальная компонента скорости среды  $v$  относительно поверхности  $z = z_1$  имеет вполне определенный знак (нормаль направлена в богатую область). Сказанное вытекает из того, что траектории жидких (в гидродинамическом смысле) частиц не могут выходить из завихренной области, и среда всегда втекает в турбулентную жидкость. Поэтому  $v > 0$  в первом случае и  $v < 0$  во втором.

Отсюда ясно, что при  $z_0 = 1$  конвективные движения пре-

пятствуют переносу горючего от поверхности  $z = z_1$  в бедную область факела, а при  $z_0 \ll 1$  - способствуют этому переносу, т.е. состоянию, описываемое соотношением (2.2), в первом случае достигается быстрее, чем во втором, где оно может вообще не достигаться.

Следовательно, система (2.1), для которой вытекает соотношение (2.2), вообще говоря, несправедлива в области  $z < z_1$ .

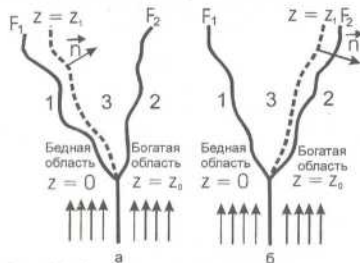


Рисунок 2.3 - Схема смешения горючего и окислителя:  
а)  $z_0=1$ ; б)  $z_0 \ll 1$ ;  $z$  - концентрация горючего

Таким образом, важную роль играет правильное описание скорости  $v$ . Эта часть задачи сводится к описанию эволюции распределения вероятностей величины  $z$ . Чтобы пояснить сказанное, рассмотрим пример - однородную турбулентность, в которой концентрации всех веществ распределены статистически однородно.

Перейдем в систему координат, движущуюся со средней скоростью  $v$  и вместо эволюции вдоль координаты  $x$  рассмотрим изменение во времени  $t$ , считая течение во всех направлениях однородным, а поток неограниченным. Относительный объем областей  $z < z_1$  есть вероятность величины  $z$ , а изменение этого объ-

ема определяется расходом через поверхность  $z = z_1$ , то есть величиной  $v$ .

Пусть  $g = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_V \rho \delta dF$  ( $V$  - некоторый объем;  $F$  - та часть поверхности  $z = z_1$ , которая заключена внутри этого объема).

Предположим, что химическая неравновесность слабо влияет на плотность  $\rho$ , т.е.  $\rho$  единственным образом выражается через  $z$  [196]. Интегрируя уравнение неразрывности по  $z < z_1$ , получим:

$$g = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_{z=0}^{z_1} \frac{\partial \rho}{\partial t} d^3x = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_1} \rho P dz, \quad (2.3)$$

где  $P$  - плотность распределения вероятностей  $z$ .

Чтобы упростить уравнение (2.3), воспользуемся теорией, из которой следует, что:

$$\frac{\partial \rho P}{\partial t} = -\langle N \rangle \frac{\partial^2 \rho P}{\partial z^2},$$

$$P = \gamma_1(t) \delta(z) + \gamma_2(t) \delta(z - z_0) + \gamma_3(t) P_1(z, t),$$

$$\rho P = \frac{2}{z_0} \rho(z^0) \sum_{l=0}^{\infty} \sin(\pi k z^0 / z_0) \sin(\pi k z / z_0) \exp(-\pi^2 k^2 \tau) \quad (2.4)$$

$$(0 < z < z_0), \quad \tau_0 = z_0^2 \int_1^{\infty} \langle N \rangle_t dt, \quad \langle N \rangle_t = \langle N \rangle / \gamma_3.$$

Здесь  $z^0$  - концентрация при  $t \rightarrow \infty$ ;  $\delta$  - дельта-функция; нижний индекс  $l$  соответствует условному осреднению по турбулентной жидкости. Три слагаемых во второй формуле в системе уравнений (2.4) описывают процессы в областях 1-3, указанных на рисунке. При этом  $P_1$  - условная плотность вероятностей концентрации в турбулентной жидкости. Из (2.3), (2.4) получим:

$$g = -\langle N \rangle_t \left. \frac{\partial \rho P}{\partial z} \right|_{z=z_1}. \quad (2.5)$$

Из уравнения (2.5) следуют те же качественные результаты, что были получены при анализе знака  $v$ . Используем соотношение, которое установлено при анализе начального участка смешения ( $t \rightarrow 0$ ):

$$\langle N \rangle_t = b z_0^2 / t, \quad (2.6)$$

где  $b$  - постоянная.

Согласно выражению (2.6),  $\tau \rightarrow \infty$  при  $t \rightarrow 0$ . Поэтому в системе уравнений (2.4) существен лишь первый член уравнения второго ряда, т.е.:

$$\rho P = \frac{2}{z_0} \rho(z^0) \exp(-\pi^2 \tau) \sin(\pi z^0 / z_0) \sin(\pi z / z_0), \quad (2.7)$$

Из уравнений (2.5), (2.6) получаем  $g < 0$  ( $v > 0$ ) при  $z_1 < z_0/2$  и  $g > 0$  ( $v < 0$ ) при  $z_1 > z_0/2$ . Введем величину  $y = \lim_{V \rightarrow \infty} \int_V \rho c d^3x$ , характеризующую содержание горючего в бедной части факела, и введем для нее приближенное уравнение. Интегрируя уравнение диффузии по области  $z < z_1$ , получим точное соотношение:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = I_1 - I_2;$$

$$I_1 = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_F \partial \varphi \rho dF, \quad (2.8)$$

$$I_2 = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_F D \rho \frac{\partial c}{\partial n} dF.$$

Первое слагаемое в уравнении (2.8) не описывает процессы

переноса, так как оно обуславливает изменение  $y$  даже в том случае, когда  $c = \text{const}$  при всех  $z$  (что объясняется переменностью объема  $z < z_1$  в процессе смешения). Второе слагаемое определяет массообмен между поверхностью  $z = z_1$  и бедной областью факела. Основное допущение состоит в том, что  $b$  и  $\varphi$  предполагаются некоррелированными. Тогда, используя уравнение (2.5), получим:

$$I_1 = \langle I_1 \rangle = \langle \varphi \rangle g = - \langle \varphi \rangle \langle N \rangle_1 \left. \frac{\partial \rho P}{\partial z} \right|_{z=z_1} \quad (2.9)$$

Предположим также, что  $I_2$  можно аппроксимировать формулой, встречающейся в приближенной теории массообмена:

$$I_2 = Ay + B \langle \varphi \rangle, \quad (2.10)$$

где  $A$ ,  $B$  — функции только  $t$ . Они находятся из следующих соображений. Пусть  $\varphi = \text{const}$  и  $c = \varphi$  в турбулентной жидкости. Тогда  $dc/dt = 0$ , следовательно:

$$y = \langle \varphi \rangle \gamma_1 \int_0^{z_1} \rho P dz + A \int_0^{z_1} \rho P dz + B = 0 \quad (2.11)$$

В случае, когда справедливо выражение (2.2):

$$y = \langle \varphi \rangle Z_1^{-1} \int_0^{z_1} z \rho P dz \quad (2.12)$$

есть одно из решений уравнения (2.8). Используя это условие и уравнение (2.11), найдем  $A$  и  $B$ . Окончательно получим:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \langle N \rangle_1 \left[ - \langle \varphi \rangle \left. \frac{d\rho P}{dz} \right|_{z=z_1} + a \left( \langle \varphi \rangle \int_0^{z_1} \rho P dz - y \right) \right], \quad (2.13)$$

$$a = \rho(z_1) P(z_1) \left/ \left[ z_1 \int_0^{z_1} \rho P dz - \int_0^{z_1} z \rho P dz \right] \right.$$

Проанализируем решения этого уравнения на начальном участке смешения и горения ( $t \rightarrow 0$ ). Из уравнений (2.6), (2.7) заключаем, что решение однородного уравнения из уравнения (2.13) есть:

$$y \approx t^{-m}, \quad m = \pi^2 b \sin f / (f - \sin f), \quad f = \pi z_1 / z_0. \quad (2.14)$$

Найдем постоянную  $b$ , считая, что смешиваются первоначально нетурбулентные потоки. В соответствии с часто используемыми аппроксимациями примем:  $\langle N \rangle_1 = u \sigma^2 / L$ ,

где  $u = \sqrt{(\langle u_x^2 \rangle - \langle u_x \rangle^2) / 3}$  — пульсационная скорость;

$\sigma = \sqrt{\langle z^2 \rangle - \langle z \rangle^2}$  — среднеквадратичная концентрация;

$L = u^3 / \varepsilon$  — масштаб турбулентности;

$\varepsilon$  — диссипация энергии.

Используя данные работы [212], полученные в плоском слое смешения, между потоком, движущимся со скоростью  $U$ , и неподвижной средой, найдем  $\langle N \rangle_1 = 5,7 \cdot 10^{-2} U z_0^2 / x$  (для линии, продолжающей кромку сопла форсулки). Считая, что характерная скорость в слое смешения равна  $0,5U$ , заключаем, что  $x = 0,5Uz$ , т.е.  $b = 0,1$ .

Оценим величину  $m$ , полагая  $z_1 = z_0 = 0,06$  (последняя цифра характерна для углеводородов). Тогда  $m = 8,5$  при  $z_0 = 1$ . Можно также показать, что левая часть уравнения (2.13) и первое слагаемое правой части на два порядка меньше второго, т.е. при  $z_0 = 1$  решение дается формулой (2.12). Этот вывод вполне понятен, так как (2.14) при  $m \gg 1$  описывает очень быстрое исчезновение горячего, проникшего в бедную область факела на ранних стадиях процесса.

Таким образом, возможен режим горения ДТ и МВС, в котором концентрации реагирующих веществ существенно зависят от кинетики химических реакций, а предыстория процессов смешения и горения не играет роли.

Существует и другой режим, в котором предыстория важна, так как постоянная  $m$  быстро падает при уменьшении  $z_0$ . Так,  $m = 1,5$  при  $z_0 = 0,11$  (коэффициент избытка воздуха в богатой смеси равен 0,5). В этом случае уравнение (2.14) описывает достаточно медленное убывание концентрации горячего, проникшего в бедную область факела на ранних стадиях процесса. Подобное, по-видимому, имеет место в КС дизелей при сжигании обогащенной МВС.

Высказанные соображения позволяют объяснить уменьшение полноты сгорания, которое наблюдается в дизеле при работе на МВС при большом увеличении коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

В этом случае пропорционально  $\alpha$  растет коэффициент избытка воздуха в первичной зоне и, следовательно, из-за уменьшения  $z_0$  во вторичной зоне к зоне реакций переносится все меньше и меньше топлива, проникшего в бедную область факела. Рассмотрим характер решений уравнений (2.13) при  $t \rightarrow \infty$ . В этом случае ряд (2.4) асимптотически сходится к плотности нормального распределения вероятностей, т.е. зона реакции наблюдается при всех  $z$  (все значения  $z$  возможны). Решение тем не менее не стремится к нулю, т.е. все топливо, попавшее в бедную область факела, полностью сгореть не может (формально это следует из того, что при  $t \rightarrow \infty$  все коэффициенты в правой части уравнения (2.13) быстро стремятся к нулю). Из уравнения (2.5) видно также, что  $g > 0$  ( $U < 0$ ) при  $t \rightarrow \infty$  и  $z < z_1$  (плотность нормального распределения вероятностей - уменьшающаяся функция  $z$  в области  $z > z_1$ ). Сделанный вывод вполне естествен, так как на заключительном этапе смешения любая область  $z > z_1 > z_2$  стягивается в точку и поэтому на поверхности  $z = z_2$  скорость всегда направлена в бедную область факела. Следовательно, в этом случае концентрация  $c$  зависит от предыстории процессов смешения и горения.

Проанализируем влияние интенсификации смешения на полноту сгорания. Очевидно, что:

$$\langle \rho c \rangle = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_V \rho c d^3x = y = y_2, \quad (2.15)$$

$$y_2 = \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \int_{\rho < \rho_2} \rho c d^3x. \quad (2.16)$$

Величина  $y_2$  дает содержание топлива в богатой области факела. Ее анализ не представляет особого интереса, так как при смешении богатые области пропадают, т.е.  $y_2 \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Рассмотрим процесс на начальном участке, считая, что  $z_0 = 1$ , а  $b$  варьируется, например, из-за дополнительной турбулизации потока. Примем простую модель: при  $N < N_*$  процесс равенновесен ( $\varphi = 0$ ), а при  $N > N_*$  горение невозможно ( $N_* \approx t_1^{-1}$  определяется химической кинетикой;  $t_1$  - характерное время реакции). Тогда при  $t < t_1 = z_0^2 b / N_*$  происходит чистое смешение, т.е.

$c = z$ . Из уравнений (2.4), (2.6) следует  $y(t_1) \approx t_1^{2b}$ . Коэффициент пропорциональности в этом соотношении не зависит от  $b$ ,  $N_*$  и поэтому не выписан. Следовательно, из уравнения (2.3) получим:

$$y(t) \approx t_1^{2b} \cdot (t/t_1)^m. \quad (2.17)$$

Если оба потока не турбулизованы, то, как показано выше,  $b = 0,1$ ,  $m = 85$ , т.е. при слабой турбулизации потока основное изменение  $y$  обусловлено множителем  $(t/t_1)^m$ . Поскольку  $m \approx b$ , то при увеличении  $b$  этот множитель уменьшается, если  $tN_* < Z_0^2/\epsilon$ , и увеличивается в противном случае.

Таким образом, приходим к выводу о том, что в режиме, когда кинетика химических реакций существенна, интенсификация смешения может приводить к увеличению полноты сгорания. Физическая интерпретация этого вывода основана на том, что в рассматриваемом случае происходит три процесса. Во-первых, на ранних стадиях увеличивается количество горячего, проникшего в бедную область факела, во-вторых, уменьшается длина, на ко-



торой это топливо диффундирует к зоне реакции, в третьих, увеличивается перенос топлива к зоне реакции. Взаимодействие указанных факторов приводит к тому, что при интенсификации смешения полнота сгорания может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Подчеркиваем, что сделанный вывод справедлив, если воздействие направлено только на смешение. Если же воздействие направлено на химическую кинетику (например,  $N_0$  растет вследствие увеличения давления или начальной температуры), эффективность процесса монотонно улучшается ( $b = const, m = const$ ).

В заключение остановимся на тех результатах проведенного исследования, которые могут представить практический интерес. Прежде всего, отметим, что рациональная организация сжигания должна основываться на создании такого течения, в котором нормальная компонента скорости среды относительно зоны реакции направлена из бедной части факела в богатую. Это условие играет особенно важную роль в начальных стадиях процесса, так как именно здесь и происходит основное проникновение горючего в бедную часть факела. Один из методов реализации указанного условия - сжигание как можно более богатой смеси. Наконец, отметим, что даже в тех случаях, когда химическая кинетика играет важную роль, интенсификация смешения может оказаться полезной.

### 2.3. Теория процесса образования и выгорания частиц сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

#### 2.3.1. Теория процесса образования сажи в газодизеле с турбонаддувом с впрыскиванием запального ДТ в камеру сгорания типа ЦНИДИ

Для определения количества образующейся при сгорании топлива сажи пользуются понятиями массовой концентрации  $C$  сажи, относительной концентрации  $\gamma$  сажи и количества  $N$  частиц сажи в единице объема в цилиндре дизеля.

На основании закона Бугера - Беера действительная массовая концентрация  $C$  при сером характере излучения может быть выражена через относительную концентрацию

$$C = \gamma/M,$$

где  $M$  - число Бугера, для условий эксперимента  $M = const$ .

Поэтому относительная концентрация  $\gamma$  всегда пропорциональна действительной массовой  $C$  и определяется только степенью ослабления луча в цилиндре дизеля, т.е.

$$\gamma = MC = \ln(I_0/I_1),$$

где  $I_0$  и  $I_1$  - интенсивности луча начальная и после его прохождения через цилиндр.

Таким образом, параметр  $\gamma$  характеризует качественное изменение действительной концентрации, вызванное образованием сажи, ее выгоранием и изменением объема цилиндра.

Для оценки изменения сажевого содержания, вызванного только объемным процессом сажевыделения, необходимо исключить влияние переменного объема цилиндра на результирующую концентрацию сажи. При известных концентрациях  $C$  и  $\gamma$  массовое сажевое содержание в цилиндре в некоторый момент времени, которому соответствует объем цилиндра  $V_1$ , определится как

$$\tau V_i = MCV_i$$

Выбирая в качестве объема приведения некоторый единый объем  $V_0$ , получим

$$\tau = MN,$$

где  $\tau = \bar{C}(V_i/V_0)$  - относительное сажеосодержание в цилиндре при условии постоянном объеме  $V_i = V_0$ ;

$\tau = C(V_i/V_0)$  - абсолютное сажеосодержание в цилиндре при условии постоянном объеме  $V_i = V_0$ .

Для зависимостей  $C = f(\varphi)$  и  $\tau = f(\varphi)$  характерно непрерывное увеличение концентрации до максимального значения и последующее снижение до значений, определяющих дымность ОГ. Каждому характерному участку зависимости  $C$ ,  $\tau = f(\varphi)$  соответствует свой максимум скорости. Время достижения максимальной концентрации сажи в дизелях составляет 4...5 мс. Специфика рабочего процесса газодизеля и связанное с этим изменение физических условий в КС сопровождаются соответствующим изменением абсолютных значений максимальной концентрации  $C_{max}$ , сажеосодержания к началу выпуска  $C_{вых}$  и скорости массового выгорания сажи от  $C_{max}$  до  $C_{вых}$ . С точки зрения конечных результатов процесса сажевыделения концентрация  $C_{вых}$  и дымность ОГ в значительной степени определяются интенсивностью массового выгорания сажи на участке после  $C_{max}$ , которая зависит как от скорости процесса, так и от располагаемого времени. При этом временной фактор играет определяющую роль в снижении дымности ОГ дизелей, значительно различающихся по степени быстротходности. В несколько раз большее располагаемое время выгорания сажи в цилиндре среднеоборотного дизеля по сравнению с быстроходным обеспечивает выгорание более 80% образовавшейся сажи и практически ее отсутствие в ОГ. В быстроходных дизелях по оценке ряда исследователей к началу выпуска успевают выгореть только 50...65% от  $C_{max}$ .

Весь накопленный многочисленный экспериментальный материал по влиянию различных факторов на динамику сажевыделения в дизелях свидетельствует о тесной связи процесса саже-

выделения с показателями процесса сгорания и, прежде всего, с динамикой тепловыделения в цикле. Сопоставляя изменение основных показателей процесса сгорания с изменением результирующего сажевыделения, видим, что во всех случаях концентрация сажных частиц в цилиндре достигает максимального значения почти одновременно с максимальной скоростью тепловыделения на участке диффузионного сгорания. Начало сажевыделения всегда совпадает с началом видимого сгорания и началом активного тепловыделения. Это означает, что сажа в цилиндре дизеля образуется сразу же, как только появляется устойчивый фронт пламени. Интенсивность процессов образования и выгорания сажи, косвенно характеризуемая значениями  $C_{max}$  и  $C_{вых}$ , также связана с характеристикой тепловыделения в цикле. Зависимости

$$C_{max} = f(dz/d\varphi)_{max}$$

и

$$C_{вых} = f(dz/d\varphi)_{вых}$$

имеют линейный характер.

Существенное снижение дымности ОГ и концентрации сажи в течение всего цикла получается при увеличении значения количества теплоты, выделяемой при гомогенном сгорании топливозоудной смеси, подготовленной за ПЗВ и одновременном снижении скорости тепловыделения в основной фазе сгорания, т.е. увеличении количества топлива, сгорающего в первой фазе видимого сгорания, и уменьшении количества топлива, сгорающего в диффузионной фазе. Именно аналогичный характер протекания кривой тепловыделения характерен для газодизеля. Следует иметь в виду, что такое перераспределение топлива между фазами приводит к возрастанию «жесткости» процесса сгорания. Процесс развития результирующего сажевыделения в КС можно представить как совокупность ряда последовательных стадий. Поскольку на результирующую концентрацию сажи в цилиндре  $C = f(\varphi)$  кроме процессов образования и выгорания сажи влияет изменение надпоршневого объема, характерные участки процесса рассматриваются на графиках результирующего сажевыделения,

приведенного к постоянному объему.

Выделение характерных участков в процессе сажевыделения основывается на предположении об относительной роли конкурирующих процессов образования и выгорания сажи. В суммарном процессе результирующего сажевыделения можно выделить основные фазы, каждой из которых соответствует свой максимум скорости. Так как в процессе сгорания происходит одновременно множество разных физических явлений, в том числе образование и выгорание сажи, то границы рассматриваемых участков имеют условный характер.

I фаза – фаза преимущественно образования сажи. Начало сажевыделения совпадает с началом активного тепловыделения, который соответствует моменту достижения максимального давления  $p_{max}$  в цилиндре.

Сравнивая первую фазу сажевыделения с динамикой тепловыделения, можно сказать, что она полностью включает в себя первый максимум активного тепловыделения, связанный с быстрым сгоранием гомогенной смеси, подготовленной за ПЗВ. Первый максимум скорости сажевыделения по времени несколько отстает от максимума скорости тепловыделения, что вполне закономерно, так как процесс сажевыделения вторичен по отношению к процессу тепловыделения. На этом участке результирующее сажевыделение определяется главным образом скоростью массового выхода сажи в результате преобладающего влияния процесса образования сажи над ее выгоранием. Действительно, в фазе быстрого сгорания пламя быстро распространяется на весь объем подготовленной смеси. Быстрое расширение фронта пламени обуславливает увеличение количества топлива, сгорающего в этом фронте по диффузионному механизму, а, следовательно, и соответствующий рост массового выхода сажи. Основная масса образующейся сажи выносится за пределы пламенной зоны относительно низких температур, где начинаются процессы окисления сажевых частиц. Так как температура газов в этот момент еще невысока, процессы замедлены и не могут конкурировать с процессами образования сажи.

II фаза – фаза одновременного образования и выгорания сажи, длящаяся до момента достижения максимального сажесодержания. Этой фазе соответствует второй максимум скорости

сажевыделения, положение которого по времени отстает от второго максимума скорости тепловыделения. В этот момент в цилиндре идет процесс развитого диффузионного горения основной части топлива. Диффузионным пламенем охвачена большая часть объема, а температура газов достигает максимального значения. Процессы образования и выгорания сажи идут с сопоставимыми скоростями, но количественный массовый выход сажи превосходит количество выгорающей сажи, и скорость результирующего процесса остается положительной, обуславливая рост сажесодержания до его максимального значения.

III фаза – фаза преимущественного выгорания сажи, длящаяся до полного открытия выпускных клапанов. Этой фазе соответствует третий максимум скорости сажевыделения, принимающий отрицательные значения, так как она характеризует уменьшение сажесодержания в цилиндре. Процесс сгорания к этому времени закончился, и происходит лишь догорание отдельных участков несгоревшей сажи. Образование сажи также практически завершилось, и продолжается интенсивное выгорание оставшейся от второй фазы сажи. Чем больше время, отводимое на выгорание сажи, тем меньше ее остается в цилиндре к моменту выпуска.

Наиболее эффективным представляется снижение дымности ОГ путем воздействия на выгорание сажи в цилиндре до открытия выпускных клапанов. С этой целью желательно смещение максимума сажевыделения в сторону в.м.т. и интенсификация турбулизация заряда в конце второй и в третьей фазах сажевыделения (во не раньше) во избежание отрицательного «эффекта перезавихряния» в начале сгорания.

### 2.3.2. Зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе

Предполагаемая структура факела топлива, впрыснутого через отверстие распылителя в МВС, представлена на рис. 2.4. В объеме факела имеется значительная неоднородность как в продольном, так и в поперечном направлении, позволяющая выде-

лить ряд зон, отличающихся по температуре и концентрации реагирующих веществ. Основная причина интенсивного сажеобразования при диффузионном сгорании предварительно перемешанной неоднородной смеси в цилиндре дизеля заключается в существовании локальных зон с благоприятными условиями для протекания реакций пиролиза углеводородов топлива. Необходимым условием образования сажи является наличие в КС высокотемпературных и переобогащенных зон, а достаточным условием – их сближение и взаимодействие.

Границы между зонами носят достаточно условный характер, и доля каждой зоны в объеме факела меняется в зависимости от развития процесса горения.

Несмотря на то, что дизель с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе работает с высоким общим коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$  и значительным обеднением смеси, в цилиндре всегда имеются зоны, в которых соотношение углевода к кислороду в смеси топлива с окислителем больше 0,5 и возможно образование сажи. Содержание сажи в конечных продуктах сгорания зависит от скорости ее выгорания в той области пламени, где отношение  $C/O < 0,5$ .

Первая зона – ядро топливного факела запальной порции ДТ (рис. 2.4) с высокой плотностью распределения частиц (расстояние между частицами порядка диаметра капли), относительно низкой температурой ( $< 1500$  К) и малым локальным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . Ядро обеспечивает перенос массы топлива вглубь КС, где сосредоточена основная масса воздуха. В процессе впрыскивания топливо в ядро практически не испаряется, а подвергается термическому и окислительному пиролизу. Воспламенение факела также не оказывает сильного влияния на размер и дальность струи, так как пламя не может проникнуть внутрь топливного факела из-за недостатка окислителя. При значительном избытке топлива в горючей смеси находящийся в недостатке кислород оказывается химически связанным только с некоторой частью наиболее легких углеводородов топлива до завершения полного пиролиза остальной части топлива, которая и является исходным сырьем для образования сажи. В ядре топливного факела, особенно вблизи носка распылителя, создаются благоприятные условия для образования час-

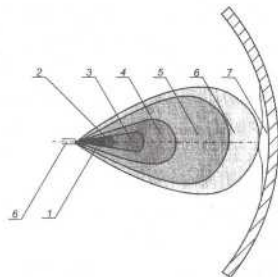


Рисунок 2.4 - Зонная модель топливного факела быстрого дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе:

1 – ядро топливного факела; 2 – уплотненный передний фронт; 3 – зона образования сажи из метана при недостатке окислителя; 4 – зона образования сажи с избытком окислителя в МВС; 5 – зона выгорания сажи в обедненной МВС; 6 – зона выгорания сажи в бедной смеси; 7 – пристеночный слой топлива; 8 – распылитель

тиц сажи по низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ), но скорость процесса сажеобразования невелика.

При НТФМ химическим зародышем сажевой частицы является фенильный радикал  $C_6H_5$  или бензильный радикал  $C_4H_3$ , получаемые в результате термического и окислительного пиролиза ароматических углеводородов при низких температурах. Этот механизм является преобладающим при температурах менее 1500 К.

Вторая зона топливного факела – уплотненный передний фронт (рис. 2.4). Передняя часть струи, встречая значительное сопротивление окружающей среды, тормозится, деформируется и отбрасывается в сторону, образуя вторую зону. Эта зона характеризуется повышенной плотностью частиц, недостатком воздуха,

малым коэффициентом  $\alpha$ , но более высокой температурой по сравнению с ядром ( $T > 1500$  К). При развитии факела частицы топлива, попавшие во фронт, быстро теряют свою скорость, нагреваются от трения о встречный поток МВС, испаряются и постепенно расщепляются турбулентными газовыми потоками внутри оболочки факела. Так как скорость движения ядра больше скорости вершины факела, происходит постоянное обновление фронта факела. Сажа в данной зоне образуется в основном по высокотемпературному ацетиленовому механизму (ВТАМ), при котором исходные углеводороды топлива под действием высоких температур разлагаются до ацетилена, обладающего высокой стабильностью при повышенных температурах. Скорость образования сажи высока, и концентрация сажи резко возрастает. Передняя часть факела может содержать атомы углерода и комплексы атомов, образуемые в результате термического разложения метана  $\text{CH}_4$  и его радикалов  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$ . В условиях повышенных температур происходит разложение углеводородов топлива на более простые с образованием в качестве конечного продукта ацетилена. При высоких температурах практически все углеводороды могут превратиться в ацетилен, так как с ростом температуры энергия образования ацетилена уменьшается, а его устойчивость возрастает. Взаимодействуя с атомами водорода  $\text{H}$  и радикалами  $\text{OH}$ , ацетилен полимеризуется, образует циклические и полициклические структуры, которые являются предшественниками сажи. В результате дальнейших реакций из сажевых зародышей образуются сажевые частицы.

Третья зона характеризуется высокой температурой ( $> 1500$  К) и недостатком кислорода в МВС. В этой зоне происходит образование частиц сажи за счет дегидрогенизации (отщепления атомов водорода) молекулы метана  $\text{CH}_4$  и ее радикалов. Образующиеся углеводородные радикалы и атомарный водород являются химически активными и могут образовывать дополнительные цепи химических реакций, приводящих к образованию зародышей сажи.

Четвертая зона представляет собой МВС с избытком окислителя. Капли топлива попадают в нее из второй и третьей зон факела путем рассеивания фронта, а также отрыва капели от боковой поверхности осевой струи. Преобладающими являются ре-

акции окисления  $\text{C}_n\text{H}_m$ , определяющие тепловой режим в цилиндре газодизеля. Для этой зоны характерны наибольшая температура, избыток окислителя и турбулентное перемешивание паров топлива и воздуха. В этих условиях протекают процессы образования и окисления частиц сажи при взаимодействии их с окислителем в цилиндре газодизеля с турбонаддувом, характеризующегося высоким общим коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .

В пятой зоне топливовоздушная смесь более бедная по сравнению с четвертой зоной. Вследствие избытка в этой зоне окислителя, создаются условия для дальнейшего окисления метана и сажевых частиц (углеродных комплексов). Эта зона занимает наибольший объем КС по сравнению с остальными. Высокая турбулентность заряда вследствие применения турбонаддува обеспечивает подвод кислорода к поверхности сажевых частиц и вынос продуктов сгорания из зоны реакции, что способствует более полному выгоранию частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом.

Шестая зона представляет собой еще более бедную топливовоздушную смесь, в которой в условиях высоких температур, коэффициента избытка воздуха и интенсивного перемешивания смеси преобладают реакции окисления (выгорания) сажевых частиц.

Дизель с турбонаддувом 4СН11,0/12,5 имеет КС типа ГНИДИ, в которой обеспечивается объемно-плёночное смесобразование. То есть часть заряда попадает на стенки КС и в зону клапанов. На частичных режимах работы доля топлива, попавшего на стенки КС, увеличивается из-за снижения плотности воздушного заряда, что связано со значительным снижением наддува и увеличением дальности струи. При попадании струи топлива на стенки КС и в зону клапанов образуется относительно холодный перебогатенный пристеночный слой топлива (пристеночный поток), развивающийся по поверхности поршня и клапана (зона 7). Скорости испарения и окисления в этой зоне резко снижаются, и происходит термический пиролиз углеводородов топлива.

Внутри топливного факела движение капели топлива и газа турбулентное, то есть кроме потока газа, увлекаемого вдоль оси факела, имеется вихревое и поперечное движение газа и жидко-

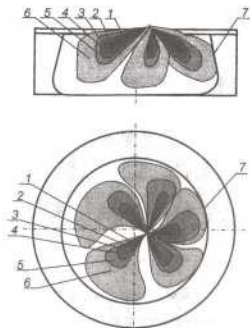


Рисунок 2.5 - Зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе. (обозначения см. на рис. 2.4)

сти. Это способствует выравниванию концентраций топлива в объеме факела и делает границы между зонами достаточно неустойчивыми, однако скорости такого движения невелики, и оно не оказывает значительного влияния на структуру факела.

Организованное вихревое движение заряда в цилиндре способствует равномерному распределению топлива в объеме КС за счет сдувания паров топлива с поверхности капель топливного факела, но оно не способно разрушить структуру факела.

Таким образом, на основании построенной модели структуры топливного факела в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе видно, что сажа образуется только в небольшой внутренней части струи, в которой имеется недостаток окислителя. В остальной части факела проис-

ходит выгорание сажевых частиц, так как газодизель работает на бедных смесях даже на режимах высоких нагрузок. Этим можно объяснить низкий уровень результирующего сажевыделения дизеля 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе.

На рис. 2.5 представлена зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе при впрыскивании запальной порции ДТ.

Образование частиц сажи происходит в очаге сгорания, где в небольшом объеме они имеют высокую концентрацию. Турбулентное движение охватывает весь объем цилиндра, включая пограничные слои и, естественно, что основным механизмом переноса частиц сажи является турбулентная диффузия, т.е. происходит перенос частиц из объема очага образования в окружающую область (т.е. в объем цилиндра), где концентрация частиц гораздо меньше. Вследствие этого их концентрация в цилиндре выравнивается. Кроме переносной скорости частицы имеют плотность, отличную от плотности газов в цилиндре, и вследствие действия инерционных сил они движутся относительно окружающих и переносащих их газовых объемов. Так как размеры частиц значительно превышают размеры молекул газа, то, очевидно, тепловое движение молекул газа, обуславливающее молекулярную диффузию, не оказывает влияния на их движение в турбулентном потоке. Попадая в зоны с избытком окислителя, частицы сажи начинают выгорать и их концентрация снижается.

### 2.3.3. Уточненный химизм образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе

Уточненный химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе можно представить в следующем виде (рис. 2.6).

Нами предполагается, что основными механизмами, оказывающими наиболее весомый вклад в образование сажевых частиц в цилиндре газодизеля, являются низкотемпературный фенильный механизм, преобладающий при температурах менее 1500 К,

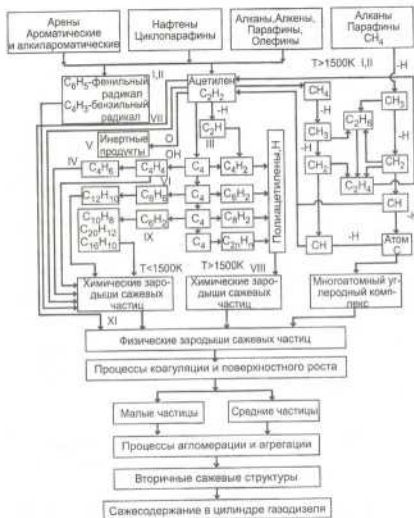


Рисунок 2.6 - Уточненный химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

и высокотемпературный ацетиленовый механизм, преобладающий при более высоких температурах.

При попадании в КС углеводороды топлива, подвергаясь термическому воздействию в цилиндре двигателя, разлагаются с образованием активных радикалов и ацетилена. Причем при температурах менее 1500 К происходит образование фенильного  $C_6H_5$  и бензильного  $C_6H_5-CH_2$  радикалов через ацетилен (цепи I и II). Образовавшиеся радикалы вступают во взаимодействие с ацетиленом  $C_2H_2$ , радикалом  $C_2H$  и углеводородами топлива, что приводит к увеличению доли углерода в молекуле, постепенной дегидрогенизации и образованию химического зародыша сажевой частицы.

При температуре более 1500 К углеводороды топлива и метан  $CH_4$  под действием термического пиролиза разлагаются до ацетилена (правая часть рис. 2.6). При этом молекула метана подвергается дегидрогенизации с образованием радикалов  $CH_3$ ,  $CH_2$ ,  $CH$  и образованием атомарного углерода  $C$ . Эти радикалы при взаимодействии с ацетиленом и радикалом  $C_2H$  образуют химические зародыши сажевых частиц, которые в процессе поверхностного роста образуют минимальную сажевую частицу – физический зародыш. В результате процессов коагуляции происходит укрупнение частиц и образуются первичные сажевые частицы. При столкновениях и взаимодействии сажевых частиц образуются более крупные вторичные печочные структуры. Этот процесс называется агломерацией. Однако при высокой скорости горения, характерной для газодизеля с турбонаддувом, и малом времени, отводимом на агрегацию, она играет несущественную роль. Если в зоне пламени, где присутствует углерод, находятся окислительные группы, то наряду с образованием сажи будет протекать процесс окисления сажевых частиц и углерода, находящегося в жидкой или газообразной фазе.

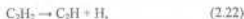
На начальном этапе происходит термическое разложение молекул топлива на более низкомолекулярные углеводороды по радикально-цепному механизму по следующей возможной реакции:



На втором этапе происходит термическое разложение и превращение полученных углеводородов с образованием ацетилена ( $C_2H_2$ ), который является, как было отмечено выше, наиболее устойчивым углеводородом при высоких температурах:



На третьем этапе термическое взрывное разложение ацетилена приводит к образованию радикалов-зародышей  $C_2H$ :



либо  $C_2H$  образуется в результате соударения двух молекул



Скорости моно- и бимолекулярных реакций становятся равными при  $T = 1400$  К, при более высоких температурах скорость первой реакции больше скорости второй реакции.

Образовавшиеся монаорадикалы  $C_2H$  и  $H$ , взаимодействуя с молекулами  $C_2H_2$ :



дают продолжение цепей образования исходных активных частиц  $C_2H$ ,  $H$  и приводит к появлению бирадикала диацетилена  $C_4H_2$ . Источником ионов  $H$  является также реакция диссоциации водорода, который всегда присутствует в углеводородных пламенах.

Сильное влияние концентрации атомарного водорода на выход сажи связано с наличием в высокотемпературном ацетиленовом механизме образования сажи интенсивного канала образования химических радикалов-зародышей  $C_2H$  из ацетилена по реакции (2.26).

На преобладающую роль этой реакции в генерировании ра-

дикалов  $C_2H$  перед реакциями термического распада ацетилена и бимолекулярного механизма указано в работах А.В. Крестинина.

Согласно общепринятой и экспериментально подтвержденной схеме образования сажи, сформулированной и развитой в работах научной школы Л.А. Теснера, на первой стадии процесса в результате объемных гомофазных химических реакций образуется химический зародыш сажевой частицы ( $C_2H$ ,  $C_4H_2$ ,  $C_4H_3$ ). Из него образуется физический зародыш сажевой частицы.

Четвертым этапом является дальнейший рост числа атомов углерода в радикале до 80...100 и образование физической поверхности минимальной сажевой частицы, т.е. физического зародыша сажевой частицы:



Промежуточными продуктами данных реакций являются полиацетилены, а конечными продуктами - сажа и водород.

Кроме этого, в пламенах обнаруживаются также бутадиен  $C_4H_6$ , винилацетилен  $C_4H_4$ .

Появление в пламени винилацетилена  $C_4H_4$  и фенольного радикала  $C_6H_5$  можно объяснить следующей возможной последовательностью реакций:



После образования физического зародыша сажевой частицы начинается гетерогенный процесс поверхностного роста частицы до характерных размеров (кристаллита).

Химизм процесса заключается в разложении молекулы углеводорода или радикала на поверхности частицы. При быстром



охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов не успевают пройти все стадии процесса и осаждаются на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи.

Образование кристаллитов может происходить также посредством взаимодействия твердых радикалов, собранных в единые агрегаты механизмом коалесцентной коагуляции, непосредственно в сажевой частице в процессе ее графитизации. Размер образующихся частиц зависит от времени пребывания и степени пересыщения системы зародышами.

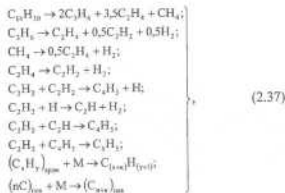
Процесс коагуляции неравнанных частиц идет параллельно с процессом поверхностного роста и оказывает существенное влияние на формирование формы и структуры частиц сажи. Процесс коагуляции зависит от степени турбулентности заряда в КС газодизеля. В зависимости от размеров частиц и физических условий процесса он может протекать в кинетическом или диффузионном режиме. По мере роста размеров частиц их радикальные свойства и концентрация снижаются.

На основании анализа ряда работ [200, 204, 260, 391, 398, 405] можно сделать вывод, что наиболее вероятный размер сажевых частиц в цилиндре газодизеля равен 10...30 нм.

Агломерация частиц сажи протекает после исчерпания углеводородов топлива и прекращения реакций поверхностного роста частиц сажи. По физической сущности процессы агломерации и коагуляции идентичны. Для процесса агломерации требуется значительное время и поэтому считается, что внутри цилиндра вероятность этого процесса мала.

Анализ литературных данных показывает, что при температурах менее 1500 К образование сажи протекает по НТФМ, при котором химическим зародышем сажевой частицы является углеродный радикал  $C_6H_5$  — фенил.

Система химических уравнений, составленная по суммарным маршрутам реакций цепного механизма крекинга углеводорода топлива  $C_nH_m$  и продуктов его разложения при условной молекуле топлива  $C_{14}H_{30}$  для НТФМ, представляется следующим образом:



где  $M$  — молекула углеводорода или углеводородный радикал.

Константы скоростей реакций образования сажи находятся из выражения

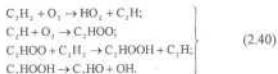
$$k_i = A \cdot 10^a \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad i = 1 \dots 5, \quad (2.38)$$

а константы скоростей реакций газификации сажи вычисляются через координаты полоса В.В. Померанцева [295]  $k^1 = 8,5 \text{ м/с}$  и  $T^* = 2500 \text{ К}$  в соответствии с выражением

$$k_i = k^1 \exp\left[\frac{E_i}{RT} \left(1 - \frac{T}{T^*}\right)\right], \quad i = 6 \dots 10. \quad (2.39)$$

Численные значения коэффициентов аппроксимации и энергии активации реакций образования и выгорания сажи взяты из работ В.Н. Мальцева, В.В. Померанцева и др.

Схема низкотемпературного окисления ацетилена может быть представлена реакциями:



Низкотемпературное окисление ацетилена приводит к увеличению концентрации радикалов  $C_2H$ , а следовательно, и к усилению цепных полимеризационных процессов, ответственных за образование сажи и диффузионных пламенах. Поваление возбужденных радикалов  $C_2$ , образующихся в реакциях



в зоне пиролиза ацетилена, указывает на образование в пиролизной зоне также радикалов  $CH_2$ ,  $CH$  и  $C$ , являющихся предшественниками возбужденных радикалов  $C_2$ . Образование радикалов  $CH_2$ ,  $CH$ ,  $C$  и других может иметь место в предпламенной зоне в реакциях ацетилена или продуктов его разложения с радикалами  $OH$ , образующимися в предпламенной зоне.

Рассмотрим возможный механизм образования сажи из метана - углеводорода с наибольшим содержанием водорода и являющимся основным компонентом КПГ:



Наиболее простым путем термического разложения метана может быть ряд последовательных стадий дегидрирования:

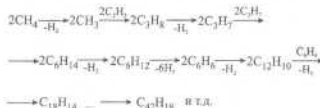


Однако расчеты показывают, что затраты энергии на образование атомов водорода, углеводородных радикалов и газообразного углерода очень велики, например:



Очевидно, что эндотермические процессы дегидрирования

должны параллельно сопровождаться какими-то экзотермическими реакциями, по-видимому, ассоциацией атомов водорода и углеводородных радикалов. Затраты энергии на образование углеводородных радикалов непрерывно снижаются с укрупнением последних. Исхода из энергетических затрат вполне убедительной выглядит, например, следующая схема:



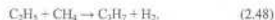
Рост углеродной цепи промежуточных радикалов следует рассматривать как радикально-цепной процесс, первой стадией которого является термическое инициирование по реакции:



Далее оба радикала могут взаимодействовать с молекулой метана:



В результате реакции (2.46) происходит рост длины углеродной цепи, этот процесс продолжается и дальше:

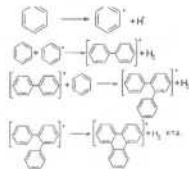


При взаимодействии углеводородного радикала с молекулой углеводорода преимущественно образуется новый, более тяжелый (а потому и более устойчивый) углеводородный радикал. Можно было бы ожидать образования атома водорода и углеводородной молекулы, например



по этот путь оказывается термодинамически невыгодным из-за очень высокой неустойчивости атомарного водорода.

Последующая полициклизация бензола, образовавшегося по этой схеме, сопровождается отщеплением водорода и ассоциацией фенольных радикалов. Она приводит к формированию полициклических конденсированных углеводородов. Образование плоских конденсированных молекул из ароматических колец, по-видимому, представляет собой цепной радикальный процесс, протекающий через промежуточное образование углеводородных радикалов с высокой степенью делокализации неспаренного электрона с их последующей конденсацией:



Полициклические углеводороды разрастаются и все дальше к периферии отщесниют имеющийся в них водород, относительное содержание которого становится все меньшим и меньшим. Происходит формирование кристаллитов, а последние затем объединяются в сажевые частицы. При их соударении формируются сажевые структуры.

Одновременно с образованием сажевых частиц идет их частичное выгорание. Процесс выгорания частиц сажи ведет к уменьшению их размеров и массового выхода в целом.

Окисление углерода. Одновременно с образованием сажевых частиц идет их частичное выгорание. В общем случае горение углерода – сложный многостадийный нестационарный гете-

рогенный процесс реагирования на внешней и внутренней поверхности неоднородной углеродной частицы, определяемый как кинетикой химических реакций, так и встречной диффузией окислителя и продуктов реакций. Нестационарность процесса обусловлена главным образом наличием турбулентности, пьезотермичностью и пьезохоричностью некоторых реакций. Поэтому исследование окисления сажевых частиц неразрывно связано с изучением влияния на него ряда факторов. Основными из которых являются реакционная способность смеси топлива с кислородом при различных температурах, хорошо освещенная в работах по химической кинетике горения, и скорость поступления кислорода к реагирующим частицам. А так как в КС дизеля с турбонаддувом течение турбулентное, а кроме того, происходит еще и значительная турбулизация потока вследствие процесса сгорания, то скорость окисления сажевых частиц будет зависеть от действительной скорости поступления кислорода к поверхности реагирующей частицы, то есть коэффициента турбулентной диффузии.

Кроме того, экспериментально доказано, что другим существенным фактором, оказывающим влияние на скорость окисления сажевых частиц, является величина удельной поверхности частиц.

С учетом общепринятых представлений с определенной степенью достоверности можно принять, что взаимодействие углерода с газами определяется диффузией газообразного реагента к поверхности частицы сажи, а сама реакция протекает на внешней геометрической поверхности образца; скорость реакции принималась бесконечно большой. Можно также предположить, что скорость реакции конечна и пропорциональна концентрации газовой реагента. Кроме этого, можно учесть подвод вещества к поверхности частицы за счет диффузии. Также можно предположить, что взаимодействие углерода с кислородом происходит не только на внешней поверхности частицы, но и в объеме, то есть необходимо учитывать подвод вещества к внутренней поверхности частицы.

Имеются доказательства, что взаимодействие частицы сажи с газами в общем случае можно разделить на пять стадий:

1) подвод газообразных компонентов к поверхности части-

шы (внешней и внутренней);

- 2) адсорбция газообразных компонентов поверхностью частицы;
- 3) реакция на поверхности частицы;
- 4) десорбция продуктов реакции;
- 5) отвод продуктов реакции от поверхности частицы (внешней и внутренней).

Углерод, образующийся в пламени, может быть газообразным, жидким или твердым. Вследствие этого и процесс окисления углерода, по нашему мнению, может быть гомогенным (на молекулярном уровне в газовой фазе), полугетерогенным (окисление зародышей конденсированных частиц, соизмеримых с крупными молекулами) и гетерогенным (окисление жидких и твердых частиц). В общем виде окисление углерода происходит за счет трех суммарных процессов:

реакций углерода с кислородом:



взаимодействия с парами воды:



и взаимодействия с диоксидом углерода:



Схематически взаимодействие твердого углерода с газами можно разбить на несколько последовательно протекающих этапов. Первым из них является доставка окислителя из газовой атмосферы к поверхности раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии. Второй этап заключается в физической или химической адсорбции молекул окислителя, сопровождающейся в ряде случаев объемным растворением. Третий этап сводится к взаимодействию адсорбированного окислителя с поверхностными атомами углерода и к образованию продуктов реакции, также

адсорбированных на графите. Наконец, четвертый и пятый этапы представляют собой десорбцию продуктов реакции и удаление (ре-диффузию) их в газовую фазу. Таким образом, процесс в целом включает в себя три вида процессов: диффузионные, адсорбционные и собственно химические, из которых два последних весьма тесно переплетаются.

При низких температурах происходит медленное окисление углерода, при котором преобладают сорбционные процессы. Сорбционный механизм взаимодействия с кислородом даже для наименее активных углей (графит, электродный уголь, высокотемпературный кокс) перестает играть роль при температурах 600...800 К. (При взаимодействии углерода с диоксидом углерода или водяным паром сорбционные явления оказывают влияние даже при температурах 1000...1200 К). По мере повышения химической активности угля и увеличения экзотермического эффекта реакции наблюдается снижение значений тех температур, после достижения которых роль сорбционных процессов значительно сокращается.

При высокотемпературном горении скорости адсорбции и десорбции настолько велики, что можно пренебречь нестационарностью, связанной с сорбционными процессами. При этом можно считать, что данному количеству поглощенного углем окислителя отвечает стехиометрическое количество выделяющихся продуктов реакции. Механизм горения в этих условиях вследствие быстроты сорбционных процессов приобретает как бы мгновенный, «ударный» характер.

Имеются предположения, что при сравнительно низких температурах только небольшая часть поверхности углерода доступна хемосорбции. Хемосорбция заметно зависит от температуры, возрастая с ее увеличением. В силу того, что с ростом температуры в хемосорбцию вовлекаются все новые, менее активные участки поверхности, обычно энергия активации хемосорбции по мере заполнения поверхности несколько повышается.

Можно предположить, что при взаимодействии углерода с кислородом при повышении температуры до 1200 К скорость реагирования возрастает по экспоненте. При более высоких температурах наблюдается некоторое торможение процесса, а затем новое увеличение скорости реагирования.

Несложно установить, что при температуре около 1050 К и давлении от 0,1 до 0,7 МПа в потоке воздуха ( $U = 0,03 \dots 0,38$  м/с) скорость выгорания углерода однозначна величине  $U_p$ . Скорость изменения поверхности сферической сажевой частицы представлена выражением

$$-\frac{dS}{dt} = K = K_0 (U_p)^{1/4} + K', \quad (2.55)$$

где  $U$  – линейная скорость потока;

$p$  – давление;

$K$  – скорость изменения поверхности сферической частицы,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;

$K_0$  и  $K'$  – коэффициенты, не зависящие от линейной скорости газов.

Из уравнения (2.55) вытекает, что скорость выгорания углеродной частицы зависит от давления и линейной скорости потока и что для покоящегося газа эффект давления равен нулю.

#### 2.3.4. Расчетная модель для определения распределения частиц сажи по размерам в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5

К наиболее важным факторам и параметрам частиц сажи относятся дисперсность частиц (размеры и функция распределения частиц по размерам), связанная с частицами в потоке тепловая и динамическая неравносности, оптические свойства материала частиц.

Необходимость в таких исследованиях обусловлена не только недостатком информации, но и жесткой привязкой результатов к условиям проведения эксперимента, что ставит под сомнение возможность использования этой информации в дальнейших корректных расчетах.

Вопросам сажеобразования в дизелях посвящено значительное число работ, затрагивающих механизмы образования сажи, ее свойства и структуру. В то же время работ по образованию сажи в цилиндрах газодизелей и определению распределения частиц

сажи в ОГ по размерам крайне мало.

При этом на основании рассмотренных работ не представляется возможным сделать определенные количественные выводы о влиянии условий горения на спектр размеров частиц сажи, образующейся в пламени при сжигании жидкого топлива и газа.

Для выяснения характера распределения частиц сажевого углерода по размерам на спектральные эффективные сечения поглощения и рассеяния в ЦКТИ были проведены исследования фракционного состава частиц сажевого углерода в пламени легкого жидкого топлива при различных условиях горения.

Анализ имеющихся кривых распределения частиц сажи по размерам показал, что все они удовлетворительно описываются зависимостью, аналогичной Максвелловскому распределению, близкому к нормальному. Обозначая  $N(x)$  распределение плотности вероятности, характеризующее дисперсный состав частиц сажевого углерода, можем написать

$$N(x) = Ax^b e^{-bx^2}. \quad (2.56)$$

Зависимость (2.56) устанавливает связь между размером частиц  $x$  и его вероятностью  $N(x)$ . Величина  $N(x)dx$  – вероятность того, что размер частиц в данном распределении будет находиться в интервале от  $x$  до  $x+dx$ .

Из условия экстремума функции  $N(x)$  следует, что параметр  $b$  непосредственно связан с величиной наиболее вероятного размера частиц  $x_0$  зависимостью

$$b = 1/x_0^2. \quad (2.57)$$

Коэффициент  $A$  определяется из условия нормировки функции  $N(x)$ :

$$\int_0^{\infty} N(x) dx = A \int_0^{\infty} x^2 e^{-bx^2} dx = 1. \quad (2.58)$$

Так как

$$\int_0^{\infty} x^2 e^{-bx} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{4} b^{-3/2},$$

то, принимая во внимание (2.40), найдем

$$\Lambda = \frac{4}{\sqrt{\pi} x_m}, \quad (2.59)$$

Тогда

$$N(x) dx = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{x}{x_m} \right)^2 e^{-4(x/x_m)^2} d \left( \frac{x}{x_m} \right). \quad (2.60)$$

Обозначая

$$\Sigma \left( \frac{x}{x_m} \right) = \Sigma(z) = z^2 e^{-z^2}, \quad (2.61)$$

получаем

$$N(x) = \frac{4}{\sqrt{\pi} x_m} \Sigma(z). \quad (2.62)$$

Проведенные расчеты показали, что функция (2.62) хорошо описывает имеющиеся опытные данные о распределении частиц сажистого углерода по размерам.

Характерная особенность функции (2.62) состоит в том, что спектр размеров частиц при любом распределении однозначно определяется лишь одним параметром — наиболее вероятным (модальным) размером частиц  $x_m$  при универсальной для всех распределений функции  $\Sigma(z)$ .

Для сопоставления различных распределений частиц по размерам удобно воспользоваться выраженной в безразмерных координатах зависимостью

$$\bar{N} \left( \frac{x}{x_m} \right) = \frac{N(x)}{N(x_m)} = \left( \frac{x}{x_m} \right)^2 e^{-4(x/x_m)^2}. \quad (2.63)$$

Для описания кривой распределения сажистых частиц по размерам Сато и Куниито воспользовались формулой Розина-Рамлера с двумя определяющими параметрами. В работах Росселера распределение частиц сажи по размерам принимается симметричным относительно  $x_m$  и описывается известной формулой Гаусса. Такое решение противоречит практически всем имеющимся опытным данным, согласно которым спектр размеров частиц сажи при самых различных условиях сжигания топлива описывается несимметричными относительно  $x_m$  кривыми распределения.

Воспользовавшись обобщенной зависимостью (2.63), не сложно определить любую осредненную характеристику спектра размеров частиц сажистого углерода в пламени как математическое ожидание определенных средних величин.

Средний размер частиц

$$\bar{x}_1 = \int_0^{\infty} x N(x) dx = \frac{4x_m}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} z \Sigma(z) dz, \quad (2.64)$$

отсюда

$$\frac{\bar{x}_1}{x_m} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}. \quad (2.65)$$

Средний квадратичный размер частиц (математическое ожидание квадрата средней величины)

$$\bar{x}_2^2 = \int_0^{\infty} x^2 N(x) dx = \frac{4x_m^2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} z^2 \Sigma(z) dz, \quad (2.66)$$

отсюда

$$\frac{\bar{x}_2}{x_m} = \sqrt{3/2}. \quad (2.67)$$

Важной характеристикой спектра размеров является средний (медианный) размер частиц  $x_m$  под которым понимается такой размер, относительно которого половина частиц имеет размеры  $x > x_m$  и половина  $x < x_m$ .

В соответствии с приведенным выше определением понятия величины  $x$ , можно написать

$$\int_0^{\infty} N(x) dx = \frac{1}{2} \quad \text{или} \quad \int_0^{\infty} N(z) dz = \frac{\sqrt{\pi}}{8}, \quad (2.68)$$

где

$$z_i = \frac{x_i}{x_m}$$

Интегрируя выражение (2.68) по частям, получаем

$$2\operatorname{erf}(z_i) - \frac{4}{\sqrt{\pi}} z_i e^{-z_i^2} = 1 \quad (2.69)$$

или

$$\frac{x_i}{x_m} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\sum \left( \frac{x_i}{x_m} \right)}{2\operatorname{erf} \left( \frac{x_i}{x_m} \right) - 1} \quad (2.70)$$

Можно показать, что для всех распределений частиц по размерам величина

$$\frac{\sum \left( \frac{x_i}{x_m} \right)}{2\operatorname{erf} \left( \frac{x_i}{x_m} \right) - 1} = 0,48,$$

следовательно,

$$\left( \frac{x_i}{x_m} \right) \approx 1,09.$$

Для построения кривой распределения частиц сажи по размерам в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе необходимо решить следующие уравнения:

$$\frac{4}{\sqrt{\pi} x_m^2} \left[ 2x_i \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{x_m}\right)^2} - x_i^2 \cdot 2 \frac{x_i}{x_m^2} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{x_m}\right)^2} \right] = 0, \quad (2.71)$$

$$\frac{8}{\sqrt{\pi} x_m^2} \left[ -\frac{2x_i}{x_m^2} e^{-\left(\frac{x_i}{x_m}\right)^2} \left( x_i - \frac{x_i^3}{x_m^2} \right) + e^{-\left(\frac{x_i}{x_m}\right)^2} \left( 1 - \frac{3x_i^2}{x_m^2} \right) \right] = 0, \quad (2.72)$$

$$N(x_m) = \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot x_m^2} \cdot x_m^2 e^{-1} = \frac{4}{e \sqrt{\pi} x_m} \quad (2.73)$$

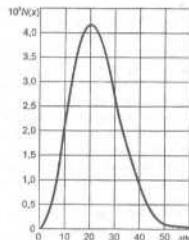


Рисунок 2.7 - Распределение плотности вероятности  $N(x)$  размеров частиц сажи в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

Решив полученные уравнения и подставив значения возможных размеров сажевых частиц в выражение (2.62), по полученным расчетным значениям строим график распределения плотности вероятности  $N(x)$  (рис. 2.7).

Полученная зависимость показывает распределение по размерам частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5.





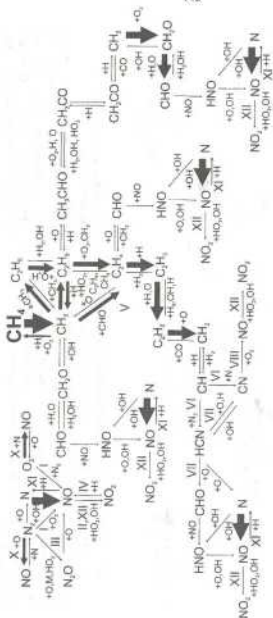


Рисунок 2.8.6 (гравифироваку см. рис. 2.8.а)

этанов образования промежуточных и конечных элементов так, как это показано на рисунке 2.8.

Цепь I характеризует образование NO при температуре более 1000 К, как результат реакции столкновения молекул азота с молекулами кислорода:

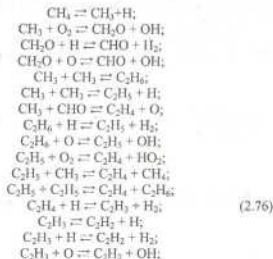


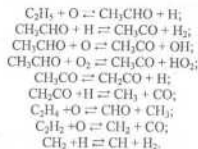
Образовавшийся оксид азота NO доокисляется до NO<sub>2</sub> под действием пероксидного радикала HO<sub>2</sub>, образующегося в зоне гибели атомарного водорода (цепь II):



По мере интенсификации процессов испарения ДТ и горения, повышения температуры и снижения  $\nu$  увеличивается вероятность развития других механизмов образования NO<sub>x</sub>.

В цепи V происходит взаимодействие молекулярного азота с углеводородными радикалами HCN и CN, образовавшимися в результате пиролиза молекулы CH<sub>4</sub> при температурах меньше 1500 К и недостатке воздуха:





В температурном уровне менее 1500 К, где имеется недостаток окислителя азота воздуха, кроме столкновения молекул азота с молекулами кислорода происходит взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами, образующимися в результате пиролиза молекулы  $CH_4$  (рис. 2.9):

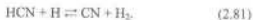


При этом в качестве промежуточных продуктов выступают соединения типа HCN и CN, участвующие в последующем цепном механизме образования NO.

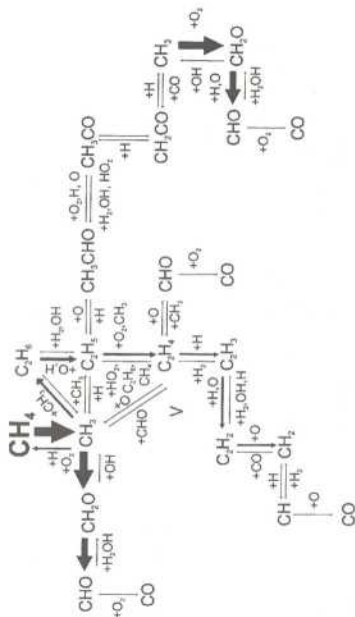
Предполагая, что половина соединений HCN, образовавшегося по реакциям (2.77) и (2.78), превращается в CN (цепь VI):



а около 10 % образовавшегося в реакции (2.77) HCN переходит в CN по реакции:



Остальная часть преобразуются в атомарный азот по реакции:



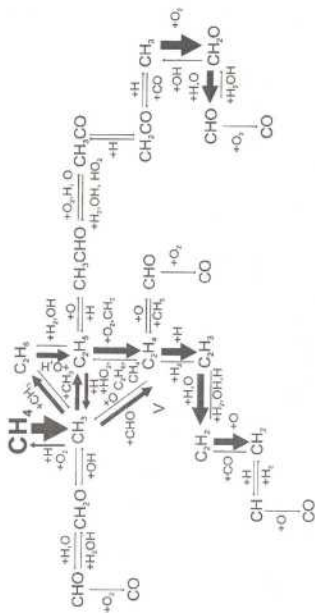


Рисунок 2.9 - Схема процесса горения метана в цилиндре газодвигателя с наддувом:  
 а - в зоне преобладания белого МВВ; б - в зоне распространения богатого МВВ

б

Образующиеся в процессе цепных реакций (2.78), (2.80) и (2.81) радикалы CN, NH являются возможными центрами образования NO (цепь VII):



Таким образом, рассмотренные химические реакции приводят к образованию «быстрых» NO.

При температуре более 2000 К происходит образование «термических» NO при диссоциации молекулы кислорода (цепь VIII):



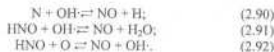
Далее происходит образование «термических» NO по механизму Я.Б. Зельдовича (цепь IX):



К моменту самовоспламенения находится большое количество локальных объемов МВС, в которой присутствуют промежуточные продукты (химически неустойчивые) низкотемпературного разложения метана, в том числе радикалы OH. Поэтому образование «термических» NO протекает также по схеме через гидроксильные радикалы (цепь X):



При глубоком пиролизе топлива в КС газодвигателя с турбонаддувом находится большое количество локальных объемов МВВ, в которых присутствуют промежуточные химически неустойчивые продукты низкотемпературного разложения метана, в том числе радикалы OH. Поэтому образование «термических» NO протекает также по схеме через радикалы OH (цепь XI на рис. 2.8):



При определении теплового режима двигателя наиболее значимыми реакциями, благодаря которым достигается максимальная температура цикла, являются реакции окисления  $\text{CH}_4$ , в результате которых происходит образование «термических»  $\text{NO}$  по механизму Я.Б. Зельдовича (цепь IX на рис. 2.8).

Вследствие этого в цилиндре газодизеля с турбонаддувом оксиды азота начинают образовываться после полного расхода углеводородов, находящихся в исходном состоянии. Поэтому образование оксидов азота напрямую связано с количеством атомарного кислорода, концентрация которого зависит от температуры в каждой зоне и времени горения МВС.

Наиболее существенными реакциями, дающими наиболее весомый вклад в процесс образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с турбонаддувом, являются реакции с радикалом  $\text{OH}$ , протекающие по механизму Я.Б. Зельдовича.

Также нельзя не учитывать тот факт, что во время такта расширения происходит образование диоксида азота  $\text{NO}_2$  по реакции 2.75 (ветвь XII на рис. 2.8), который может составлять до 20% от общего количества образовавшихся оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

В ОГ газодизеля с турбонаддувом содержится различные оксиды азота, но подавляющая часть из них образуется в результате пиролиза метана через радикалы  $\text{OH}$ .

#### 2.4.2. Статистическая модель для уточнения расчета скоростей реакций образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

Теория дает принципиальную возможность рассчитать предэкспоненциальный множитель и, следовательно, абсолютную скорость химических реакций образования оксидов азота.

С точки зрения энергетического эффекта химические превращения подразделяются на два типа: эндотермические, тре-

бующие определенного количества энергии, и экзотермические, сопровождающиеся выделением тепла. Ясно, что для протекания эндотермической реакции необходимо, чтобы сталкивающиеся молекулы обладали некоторым минимальным запасом энергии  $E$ , поэтому скорость такой реакции пропорциональна бोलлмановскому фактору  $e^{-E/RT}$  и быстро возрастает с повышением температуры.

В процессе диссоциации энергией активации служат энергия связи молекулы. Однако для большинства экзотермических превращений также требуется энергия активации, и скорости соответствующих реакций возрастает с температурой по экспоненциальному закону Аррениуса  $e^{-E/RT}$ . Рекомбинация атомов в молекулу является в этом отношении нетипичной, так как она происходит без активации и потому с легкостью протекает при низких температурах, как и многие другие реакции с участием свободных атомов [266].

При элементарном акте химического превращения независимо от того, является ли он энергетически выгодным или нет при тесном сближении частиц между ними, как правило, возникают силы отталкивания, для преодоления которых требуется определенная энергия. Для превращения должен быть преодолен потенциальный барьер.

На рис. 2.10 схематично отложена потенциальная энергия системы четырех атомов и соединений  $\text{N}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}$  на примере реакции, участвующей в процессе образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом  $\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$ , в зависимости от «координаты разложения», характеризующей взаимную пространственную конфигурацию атомов.

Потенциальная энергия системы атомов, участвующих в элементарном акте реакции, зависит от их взаимной конфигурации. Поскольку изменение координат атомов происходит достаточно медленно, электронное состояние системы меняется непрерывным образом, и потенциальная энергия зависит только от ядерных координат. Потенциальная энергия представляет собой непрерывную поверхность в конфигурационном пространстве, которая при начальной и конечной конфигурациях атомов минимальна.



Рисунок 2.10 - Потенциальный барьер химической реакции, соответствующий активированному состоянию

Для того чтобы произошла реакция, точка, описывающая движение системы в конфигурационном пространстве, должна пройти через максимум, разделяющий минимумы на поверхности, преодолеть потенциальный барьер.

При этом фактически осуществляется наиболее выгодный путь реакции, соответствующий наименьшему значению максимума энергии; поверхность энергии около этого пути имеет характер «ложбины». Рисунок 2.10 схематически изображает сечение поверхности энергии вдоль «дна ложбины», причем путь реакции соответствует координате разложения.

Вершина потенциального барьера отвечает весьма тесному сближению реагирующих частиц. В окрестности ее, в области с линейными размерами  $\delta$  порядка молекулярных, атомы образуют активированный комплекс. Однако принципиальное отличие активированного комплекса от молекулы состоит в том, что молекула находится в устойчивом состоянии с минимумом потенциальной энергии; комплекс же находится в состоянии неустойчивого равновесия с максимумом потенциальной энергии как функции координаты разложения.

Время жизни комплекса очень мало по сравнению с характерным временем реакции. Это служит основанием для основного допущения теории, которая предполагает, что комплексы, рассматриваемые как некие молекулы, которые обладают в основном обычными термодинамическими свойствами, находятся в химическом равновесии с реагентами, и концентрация комплексов «следит» за изменением концентраций реагентов.

Если считать, что каждый образующийся комплекс распадается в сторону продуктов реакции, то число актов реакции в  $1 \text{ см}^3$  в 1 сек равно числу распадов комплексов, т.е. числу комплексов в  $1 \text{ см}^3$ , поделенному на время их жизни.

Обозначая химическими символами А, В, М числа реагентов А и В и комплексов М в  $1 \text{ см}^3$  (для реакции  $(N + OH \rightarrow NO + H)$  А и В есть N и OH, а М = NOH), получим, что число актов прямой реакции в  $1 \text{ см}^3$  в 1 сек равно

$$k_p r_a r_b = P r_a r_b / \tau_c,$$

откуда константа скорости прямой реакции [10]:

$$k_p = P \frac{1}{\tau_c} (r_a / r_a, r_b). \quad (2.93)$$

где P – стерический фактор, т.е. мера отклонения скорости действительной реакции от идеальной.

Соотношения между типом реагирующих веществ и стерическим фактором представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Соотношения между типом реагирующих веществ и стерическим фактором

Тип реагирующих веществ	P
Два атома	1
Атом и двухатомная молекула	$(Z_A/Z_B)$
Атом и многоатомная молекула	$(Z_A/Z_R)^2$
Две двухатомные молекулы	$(Z_A/Z_B)^2$
Двухатомная и многоатомные молекулы	$(Z_A/Z_R)^3$
Две многоатомные молекулы	$(Z_A/Z_B)^5$

Статистическую сумму можно разложить на произведение:

$$Z = Z_T Z_R Z_V. \quad (2.94)$$

Статистическая сумма одномерного поступательного движения частицы с массой  $m$  на отрезке  $\delta$ , эквивалентном «объему», занимаемому комплексами вдоль координаты разложения, равна:

$$Z_T = (2\pi m k T / h^2)^{1/2} \delta, \quad (2.95)$$

где  $m$  — масса частицы, кг;

$k$  — постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ , Дж/К;

$h$  — постоянная Планка,  $h = 6,65 \cdot 10^{-34}$ , Дж · с.

Вращательная сумма частицы:

$$Z_R = \frac{8\pi^2 I k T}{h^2} \frac{1}{\sigma}, \quad (2.96)$$

где  $\sigma$  — фактор симметрии, равный увеличенному на единицу числу перестановок одинаковых атомов в молекуле, эквивалентных вращению молекулы как целого; в двухатомной молекуле, состоящей из одинаковых атомов  $\sigma = 2$ , а из разных —  $\sigma = 1$ ;

$I$  — момент инерции частицы, кг · м<sup>2</sup>.

Квантовое выражение для статистической суммы гармонического осциллятора частоты  $\nu$ :

$$Z_V = \left( 1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right)^{-1}. \quad (2.97)$$

Момент инерции комплекса определяется по выражению:

$$I = d_{AB}^2 \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}, \quad (2.98)$$

где  $d_{AB}$  — средний диаметр реагентов А и В,

$$d_{AB} = (d_A + d_B) / 2, \text{ м.}$$

Активированный комплекс находится на вершине энергетического барьера, лежащего между начальным и конечным состоянием (рис. 2.10). Скорость реакции определяется скоростью, с которой активированный комплекс проходит через вершину барьера. Конфигурация, соответствующая активированному состоянию, обладает свойствами обычной молекулы, за исключением того, что частота нормального колебания вдоль координаты разложения имеет нулевое значение. Другими словами, активированный комплекс устойчив по отношению к перемещению во всех направлениях, кроме одного, двигаясь вдоль которого он распадается на части. Если энергетический барьер имеет сравнительно плоскую вершину, то степень свободы, соответствующая координате разложения, статически может рассматриваться как одномерное поступательное движение. Таким образом, активированный комплекс сохраняет  $3n$  степеней свободы, где  $n$  — число атомов, которое он содержит. Согласно «соотношению неопределенностей» квантовой механики для определения отдельного активированного комплекса необходимо постулировать, что на вершине барьера ему соответствует область, имеющая конечные размеры. В классической теории таких ограничений нет, и для большинства химических реакций вследствие плоской формы барьера эти ограничения несущественны. Применяемое ниже статистическое среднее из многих комплексов приводит к тому же результату.

При статическом рассмотрении скоростей реакций будем предполагать, что исходные вещества всегда находятся в равновесии с активированными комплексами, т.е. реакция не изменяет заметным образом равновесную концентрацию активированных комплексов, и что последние разлагаются с конечной скоростью. Положим, что активированному состоянию на вершине энергетического барьера соответствует потенциальный ящик произвольной длины  $\delta$  (рис. 2.10), действительная величина которой несущественна.

Истинная скорость реакции определяется средней скоростью перехода активированных комплексов через вершину барьера. Обозначим через  $\bar{v}$  среднесквадратичную скорость частицы в направлении  $x$ . Среднее изменение количества движения при столкновении рассматриваемой молекулы со стенкой равно  $2m\bar{v}$ .

Молекулы, расположенные от стенки на расстоянии  $x$ , должны достигать ее за единицу времени. Так как в объеме  $V$  имеется  $N$  молекул, то за единицу времени в каждый квадратный сантиметр стенки ударяется  $\frac{N\bar{v}}{V}$  молекул. Таким образом, скорость изменения количества движения, отнесенная к  $1 \text{ см}^2$  поверхности молекул на стенку:

$$g = \frac{2mN\bar{v}^2}{V}. \quad (2.99)$$

Кинетическая энергия для одной степени свободы вдоль оси  $x$  равна  $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$ , следовательно вероятность того, что молекула имеет скорость, лежащую между  $\bar{v}$  и  $\bar{v} + d\bar{v}$ , в данном направлении равняется:

$$\bar{g}(\bar{v}) = e^{-\frac{m\bar{v}^2}{2kT}} d\bar{v}. \quad (2.100)$$

Если предположить, что в активированном состоянии имеется распределение скоростей, то средняя скорость движения комплексов в одном направлении, а именно — в направлении прямой реакции, определится следующим образом:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} e^{-\frac{m\bar{v}^2}{2kT}} \bar{v} d\bar{v}}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{m\bar{v}^2}{2kT}} d\bar{v}}. \quad (2.101)$$

Пределы интегрирования взяты от  $\infty$  до  $-\infty$ , что учитывает фактическое движение комплексов в обоих направлениях, а то время как в числителе интегрирование производится в пределах от нуля до бесконечности, так как требуется определить среднюю скорость движения только в направлении разложения. Вычисление дает среднюю скорость прохождения активированного комплекса через барьер в одном направлении вдоль координаты раз-

ложения:

$$\bar{v} = \left( \frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}. \quad (2.102)$$

где  $m$  — эффективная масса комплекса для данного направления, кг.

Среднее время  $\tau$  прохождения через барьер, являющееся средней продолжительностью жизни активированного комплекса, равняется длине вершины барьера  $\delta$ , деленной на среднюю скорость  $\bar{v}$ , которая определяется из уравнения (2.102) следующим образом:

$$\tau = \frac{\delta}{\bar{v}} = \delta \left( \frac{2\pi m}{kT} \right)^{1/2}. \quad (2.103)$$

Доля активированных комплексов, переходящих через вершину барьера в единицу времени, равна  $\frac{1}{\tau}$  и, следовательно, если  $r_M$  представляет собой число активированных комплексов в единице объема, находящихся в пределах отрезка  $\delta$  координаты разложения, то величина  $\frac{r_M}{\tau}$  равна числу комплексов, переходящих через вершину барьера за единицу времени в единице объема. Если каждый комплекс, переходящий через барьер, распадается, т.е. если трансмиссионный коэффициент равен единице, то  $\frac{r_M}{\tau}$  равняется скорости реакции  $v$ , т.е.:

$$v = \frac{r_M}{\tau} = r_M \left( \frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta}. \quad (2.104)$$

Трансмиссионный коэффициент  $\rho$  показывает долю, которая может действительно покинуть исходное состояние и перейти

непосредственно к конечному, не возвращаясь обратно в исходное состояние (рис. 2.10).

Если вещества А, В реагируют друг с другом, образуя активированный комплекс, и  $k$  представляет собой удельную скорость реакции, выраженную в единицах концентрации, то действительная скорость, т.е. число молекул, распадающихся в единицу объема за единицу времени, равна  $k r_a r_b$ , где  $r_a$ ,  $r_b$  – концентрации, выраженные в числах молекул на единицу объема. Следовательно, уравнение (2.93) с учетом выражения (2.103) примет вид:

$$k_i = P \frac{r_M}{r_a r_b} \left( \frac{\kappa T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta} \quad (2.105)$$

Так как, согласно сделанному предположению, активированный комплекс находится в равновесии с исходными веществами, то для этой системы можно написать константу равновесия в виде:

$$K_a = \frac{\alpha_M}{\alpha_a \alpha_b} \quad (2.106)$$

где  $\alpha$  – активность различных веществ.

Если поведение участвующих в процессе веществ считать идеальным, то активности можно заменить концентрациями:

$$K_i = \frac{r_M}{r_a r_b} \quad (2.107)$$

По закону действующих масс отношение чисел частиц, участвующих в реакции  $A + B \rightarrow M$ , в состоянии равновесия равно отношению статистических сумм частиц. Выделяя из статистических сумм множители типа  $\exp(-E_0/\kappa T)$ , соответствующие нулевой энергии частиц, и заменяя постоянную Больцмана  $\kappa$  газовой постоянной на моль  $R$ , поскольку энергия  $E_0$  относится к одному моль, получим:

$$K_i = \frac{Z_M}{Z_a Z_b} e^{-\frac{E_0}{\kappa T}} \quad (2.108)$$

где  $E_0$  – разность между энергиями нулевых уровней на моль активированного комплекса и исходных веществ.

Здесь энергия активации – это величина энергии при 0 К, которую должны получить исходные вещества, чтобы перейти в активированное состояние и прореагировать.

Теперь, когда множитель  $e^{-\frac{E_0}{\kappa T}}$  вынесен за знак суммы состояний, при вычислении величин  $Z$  в уравнении (2.108) за начало отсчета энергии должны приниматься в каждом случае нулевые энергетические уровни соответствующих веществ. Это условие находится в согласии с обычным методом выражения сумм состояний и не усложняет вычислений.

С учетом уравнений (2.107) и (2.108) выражение для константы скорости прямой реакции (2.93) примет вид:

$$k_i = P \frac{Z_M}{Z_a Z_b} \left( \frac{\kappa T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta} e^{-\frac{E_0}{\kappa T}} \quad (2.109)$$

Примем длину вершины барьера равной:

$$\delta = \frac{h}{(2\pi m \kappa T)^{1/2}} \quad (2.110)$$

Тогда уравнение (2.108) примет вид:

$$k_i = P \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_a Z_b} e^{-\frac{E_0}{\kappa T}} \quad (2.111)$$

Величина  $\kappa T/h$  уже является одинаковой для всех типов исходных веществ и для всех реакций, поэтому множитель  $\kappa T/h$ , имеющий размерность частоты, для каждой температуры является универсальной постоянной. Он представляет собой частоту, с которой активированный комплекс переходит через вершину барьера при данной температуре.



Чтобы учесть возможность того, что не каждый активированный комплекс, достигший вершины барьера и двигающийся вдоль координаты разложения, будет действительно распадаться и давать продукты реакции, необходимо ввести трансмиссионный коэффициент  $\rho$ . Тогда выражение (2.111) примет вид:

$$k_1 = P \rho \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.112)$$

Комплекс устойчив, как и обычная молекула, по отношению ко всем изменениям конфигурации атомов, за исключением направления вдоль пути реакции. Поэтому если активированный комплекс считать нормальной молекулой, у которой степень свободы, соответствующую координате разложения, можно заменить жесткой связью, то, принимая активированные комплексы за нормальные молекулы, выражение  $\frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{RT}}$  можно рассматривать как константу равновесия между активированным и начальным состояниями:

$$K^M = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.113)$$

Тогда уравнение константы скорости реакции примет вид:

$$k_1 = P \rho \frac{\kappa T}{h} K^M \quad (2.114)$$

Для вывода зависимости значений констант скоростей химических реакций образования оксидов азота с режимами работы дизеля запишем уравнение Клайперона-Менделеева в виде:

$$\frac{M_i}{V_2} = 10^3 \frac{P_i \Gamma_i}{RT_i} \quad (2.115)$$

где  $M_i$  – число молей  $i$ -го компонента, кмоль;

$V_2 \Gamma_i$  – парциальный объем  $i$ -го компонента в конце расчетного участка,  $m^3$ ;

$p_2$  – давление в конце расчетного участка, МПа;

$T_2$  – температура в конце расчетного участка, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная,

$$R = 8,314 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Выражая скорость образования NO на примере реакции  $N \cdot + OH \cdot \rightarrow NO + H \cdot$  с учетом (2.115), получим:

$$k'_1 \frac{M_N M_{OH}}{V_2^2} = \frac{10^3 p_2}{RT_2} k_1 r_{e,OH} \quad (2.116)$$

где  $k'_1$  – константа скорости реакции,  $m^3/(кмоль \cdot c)$ .

Из выражения (2.115) имеем:

$$r_{e,N} = \frac{10^{-3} RT_2 M_N}{p_2 V_2}; \quad r_{e,OH} = \frac{10^{-3} RT_2 M_{OH}}{p_1 V_2} \quad (2.117)$$

Подставив выражения  $r_N$  и  $r_{OH}$  в уравнение (2.116), получим:

$$k'_1 = k_1 \frac{RT_2}{10^3 p_1} \quad (2.118)$$

где  $k'_1$  – константа скорости  $i$ -той реакции,  $m^3/(кмоль \cdot c)$ .

Выведенная зависимость позволяет рассчитать константу скорости химических реакций образования оксидов азота в цилиндре двигателя. Согласно уточненного химизма процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с турбонаддувом основной вклад в образование и разложение NO дают следующие реакции, представленные в таблице 2.2. Результаты расчетов констант скоростей химических реакций образования и разложения оксидов азота представлены также в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты расчета основных реакций образования и разложения оксидов азота в цилиндре газодизеля с наддувом

№ реакции	Реакция	Константа реакции, м <sup>3</sup> /кмоль·с
1	$N + OH \xrightarrow{k_1} NO + H$	$k_1' = 1,0 \cdot 10^{11}$
2	$NO + H \xrightarrow{k_2} N + OH$	$k_2' = 1,0 \cdot 10^{11} T_1^{-2,5} e^{-3018/T_1}$
3	$H + O_2 \xrightarrow{k_3} OH + O$	$k_3' = 1,2 \cdot 10^{11} T_1^{2,5} e^{-2018/T_1}$
4	$OH + O \xrightarrow{k_4} H + O_2$	$k_4' = 1,8 \cdot 10^{10}$
5	$N_2 + O \xrightarrow{k_5} NO + N$	$k_5' = 7,6 \cdot 10^{10} e^{-3000/T_2}$
6	$NO + N \xrightarrow{k_6} N_2 + O$	$k_6' = 1,6 \cdot 10^{10}$
7	$N + O_2 \xrightarrow{k_7} NO + O$	$k_7' = 6,4 \cdot 10^8 T_2 e^{2100/T_2}$
8	$NO + O \xrightarrow{k_8} N + O_2$	$k_8' = 1,5 \cdot 10^8 T_2 e^{-1900/T_2}$
9	$N_2 + O_2 \xrightarrow{k_9} NO + NO$	$k_9' = 5,48 \cdot 10^9 e^{-31000/T_2}$
10	$NO + NO \xrightarrow{k_{10}} N_2 + O_2$	$k_{10}' = 2,6 \cdot 10^9 e^{1120/T_2}$

#### 2.4.3. Уточненная зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

С учетом феноменологии горения ДТ, впрыскиваемого через многоструйную форсунку в МВС цилиндра газодизеля с наддувом, метанотопливовоздушный заряд, образующийся после впрыскивания топлива в КС, с учетом вовлечения в движение струи МВС из окружающего пространства, молекулярной и турбулентной диффузии, как в топливном факеле, так и в окружающем пространстве КС в осевом и радиальном направлениях с учетом закручивающегося потока МБВВ, можно, принимая во внимание, что концентрационная неоднородность также будет иметь место, выделить ряд зон в КС, где характер протекающих процессов и распределение компонентов образования оксидов азота будут существенно отличаться (рис. 2.11) [209].

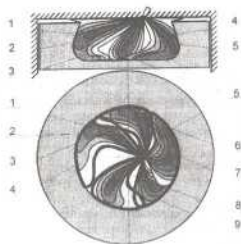


Рисунок 2.11 - Уточненная зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе:

1 — зона образования NO по бимолекулярной реакции; 2 — зона образования «быстрых» NO; 3 — зона образования «быстрых» и «термического» NO; 4 — зона образования «термического» NO по механизму Я.Б. Зельдовича; 5 — зона с преобладанием бедного МБВВ; 6, 7, 8, 9 — участки с зонами преобладания богатого МБВВ.

При турбулентном движении потоков значения скоростей и концентраций оксидов азота непрерывно меняются и в результате чего зоны распространения носят условный характер и поэтому при перемешивании МВС можно говорить лишь об устойчивости средних по времени границ.

Первая зона (рис. 2.11) представляет собой ядро топливного факела с большим количеством локальных объемов, в которых содержится большое количество углеводородного топлива и недостаток окислителя, поэтому в этой зоне характерно образование NO по бимолекулярной реакции, т.е. молекулами кислорода при температуре выше 1000 К:



(2.119)

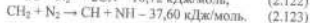
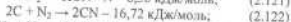
Далее оксид азота доокисляется до NO<sub>2</sub>:



Количество NO<sub>2</sub>, образовавшегося в результате реакции (2.120), может достигать 15 % от общего количества NO<sub>x</sub>.

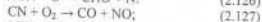
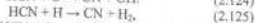
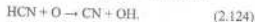
В результате турбулентной и молекулярной диффузии образуется большое количество локальных объемов, в которых содержится МВС, готовая к взрыву, и углеводородное топливо, в результате чего появляется возможность образования оксидов азота по другим механизмам.

Вторая зона (рис. 2.11) характеризуется также недостатком окислителя, поэтому в оболочке топливного факела происходит образование промежуточных соединений HCN, CN, NH, непосредственно связанных с образованием «быстрых» NO в температурном диапазоне до 2000 К:



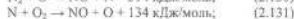
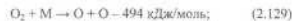
В области фронта горения МВВ (зона 2 на рис. 2.11) при высокой температуре до 2000 К и малом коэффициенте α имеет место образование существенных количеств оксида азота.

Третья зона (зона 3 на рис. 2.11) – зона быстрого молекулярного перемешивания, высокой температуры и глубокого пиролиза молекулярного метана за счет доокисления радикалов из реакций (2.121), (2.122), (2.123), в присутствии продуктов испарения жидкого углеводородного топлива. В результате этого NO<sub>x</sub> образуются по «термическому» и «быстрому» механизму:

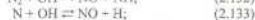


Далее за счет увеличения температуры и давления происходит инициирование процесса по «термическому» механизму

Я.Б. Зельдовича, в виде цепной схемы окисления азота, в которой активную роль играют свободные атомы кислорода и азота:



и через радикалы OH:



Четвертая зона (рис. 2.11) характеризуется избытком окислителя в МВВ с турбулентным перемешиванием паров воздуха и топлива распределенных неравномерно, поэтому образование NO происходит по «термическому» механизму Я.Б. Зельдовича при температурах выше 2000 К. Локальное же образование NO в зонах 3 и 4 связано с концентрацией атомов кислорода. Также преимущественно процессы окисления CH<sub>4</sub>, которые являются доминирующими в определении значения T<sub>max</sub>.

Зона 5 – зона с преобладанием бедного МВВ, содержащая как свежую МВС, так и продукты сгорания, вносимые из зон 1...4. Интенсивность протекания реакции образования NO будет зависеть от величины локального коэффициента избытка воздуха α и в условиях турбулентного перемешивания смеси.

Участки с зонами 6, 7, 8, 9 являются граничными между реагирующими зонами и не прореагировавшей МВС, в которых возможны только реакции доокисления NO в NO<sub>2</sub>:



Наибольший вклад в процесс образования NO в цилиндре газодизеля с наддувом вносят зоны 3 и 4, поскольку выход оксидов азота зависит от степени турбулизации заряда и величины коэффициента избытка воздуха α или локальной концентрации кислорода, длительности процесса сгорания и максимальной температуры цикла.

### 3. УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

#### 3.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизели с турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

В соответствии с разработанной методикой [332, 338, 339] проведения стендовых испытаний по переводу дизеля Д-245.12С для работы на природном газе были сняты регулировочные характеристики дизеля по установочному УОВТ как по дизельному, так и по газодизельному процессам. Данные характеристики снимались для определения оптимальных значений установочного УОВТ для дизельного и газодизельного процессов при равных значениях средних эффективных давлений [324].

Регулировочные характеристики по установочному УОВТ при работе дизеля с турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400$  и  $1900 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 3.1.

Анализируя графики, можно констатировать, что при работе по дизельному процессу по условию наилучшей экономичности при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  установочный УОВТ должен быть  $14^\circ$  п.к.в. Часовой расход  $G_p$  топлива при работе по чисто дизельному процессу на указанном установочном УОВТ составляет  $18,6 \text{ кг/ч}$  при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ . Минимальный удельный эффективный расход  $g_{e \text{ min}}$  топлива при этом значении угла составляет  $210 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . При изменении значения установочного УОВТ как в большую, так и в меньшую сторону увеличивается значение минимального удельного эффективного расхода  $g_{e \text{ min}}$  топлива (при  $\Theta_{\text{стп}} = 11^\circ$  п.к.в.  $g_{e \text{ min}} = 218 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ), а при  $\Theta_{\text{стп}} = 17^\circ$  п.к.в.  $g_{e \text{ min}} = 230 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ), наблюдается падение эффективной мощности до  $77 \text{ кВт}$  для установочных УОВТ  $8^\circ$  и  $17^\circ$  п.к.в.

Однако заводом-изготовителем рекомендуется и устанавливается оптимальное значение УОВТ  $11^\circ$  п.к.в. для обеспечения лучших экологических показателей автомобильного двигателя с

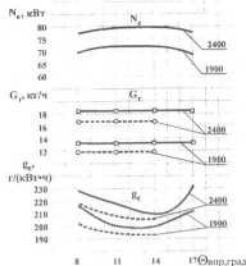


Рисунок 3.1 – Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных значениях установочного УОВТ при  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ,  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 и приемлемых значений «жесткости» процесса сгорания.

При работе по газодизельному процессу при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  по условию наилучшей экономичности оптимальный установочный УОВТ также равен  $14^\circ$  п.к.в. Суммарный часовой расход  $G_p$  топлива составляет при этом  $16,8 \text{ кг/ч}$ , при этом  $g_{e \text{ min}} = 205 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . При работе на природном газе для обеспечения качественного протекания процесса сгорания необходимо уменьшить значение установочного УОВТ из-за повышения «жесткости» процесса сгорания и максимального давления газов в цилиндре выше допустимых значений. С учетом результатов проведенных исследований для газодизельного процесса за оптимальный принят установочный УОВТ  $11^\circ$  п.к.в. При этом несколько увеличивается минимальный удельный эффективный расход топлива по сравнению с  $\Theta_{\text{стп}} = 14^\circ$  п.к.в. и составляет уже

208 г/(кВт·ч) против 218 г/(кВт·ч) для дизеля, при этом мощность двигателя остается на том же уровне. Суммарный часовой расход  $G_t$  топлива при переходе на газодизельный процесс снижается с 18,6 до 16,8 кг/ч, т.е. на 9,7 %.

При частоте вращения  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ , соответствующей режиму максимального крутящего момента, сохраняется характер изменения кривых эффективной мощности и минимального удельного эффективного расхода топлива, установленный для номинальной частоты вращения.

При снижении установочного УОВТ до  $8^\circ \text{ п.к.в.}$  происходит снижение эффективной мощности дизеля и газодизеля до 70 кВт (на 3 % по отношению к оптимальному значению установочного УОВТ  $\Theta_{\text{опт}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$ ), увеличивается значение минимального удельного эффективного расхода топлива (с 205 до 219 г/(кВт·ч) для дизеля и со 195 до 201 г/(кВт·ч) для газодизеля) и температура ОГ при работе на ДТ и на КПГ по сравнению со значениями, соответствующими оптимальному  $\Theta_{\text{опт}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$

При значении установочного УОВТ  $14^\circ \text{ п.к.в.}$ : мощность двигателя остается на прежнем уровне по отношению к оптимальному УОВТ  $\Theta_{\text{опт}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$  ( $N_e = 72 \text{ кВт}$ ), вместе с тем уменьшается минимальный удельный эффективный расход топлива (на 2,5 % для дизеля и на 1,5 % для газодизеля) при увеличении «жесткости» процесса сгорания. Оптимальный УОВТ по условиям обеспечения качественного протекания процесса сгорания составляет также  $11^\circ \text{ п.к.в.}$  для дизельного и газодизельного процессов. При этом минимальный  $g_e$  снижается со 199 до 195 г/(кВт·ч), т.е. на 2 % для газодизеля.

### 3.2. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизели с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

Исследования влияния применения природного газа на эффективные показатели работы двигателя проводились на каждом скоростном режиме при трех значениях установочного УОВТ: 8, 11 и  $14^\circ \text{ п.к.в.}$  [31]

В соответствии с методикой стендовых испытаний, нами

были проведены испытания дизели с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на эффективные показатели на различных нагрузочных режимах.

Изменение эффективных показателей дизели с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от изменения нагрузки при номинальной частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{опт}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$  представлено на рис. 3,2,а.

Анализ графиков показывает, что с увеличением нагрузки от 0,12 до 0,88 МПа при работе по дизельному процессу часовой расход воздуха  $G_a$  возрастает от 400 до 500 кг/ч, т.е. на 25 %, коэффициент наполнения  $\eta$ , цилиндров возрастает с 0,97 до 0,99 (на 2,1 %), при этом температура отработавших газов  $t_g$  возрастает от 280 до  $480^\circ\text{C}$ , т.е. на 71,4 %, а температура  $t_a$  наддувочного воздуха возрастает с 55 до  $107^\circ\text{C}$ , т.е. на 94,5 %, коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при этом снижается от 4,1 до 1,75, т.е. на 57,3 %, а в то же время эффективный КПД  $\eta_e$  возрастает с 0,18 до 0,36, т.е. в 2 раза, а часовой расход  $G_t$  топлива при этом увеличивается с 7 до 19,5 кг/ч, т.е. в 2,8 раза. Минимальный удельный эффективный расход  $g_e$  топлива при увеличении нагрузки снижается до 218 г/(кВт·ч), а давление  $p_a$  наддувочного воздуха при возрастании нагрузки увеличивается с 0,115 до 0,173 МПа, т.е. на 50,4 %.

При переходе на газодизельный процесс и изменении нагрузки от 0,12 до 0,85 МПа часовой расход воздуха  $G_a$  возрастает от 380 до 450 кг/ч, т.е. на 18,4 %, коэффициент наполнения  $\eta$ , цилиндров находится в пределах 0,95...0,96, температура  $t_a$  ОГ возрастает от 220 до  $430^\circ\text{C}$ , т.е. на 95,5 %, температура  $t_a$  наддувочного воздуха возрастает с 72 до  $98^\circ\text{C}$ , т.е. на 36,1 %. Значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при этом снижается от 2,7 до 1,7, т.е. на 37,0 %, эффективный КПД  $\eta_e$  возрастает с 0,14 до 0,38, т.е. в 2,7 раза,  $G_t$  возрастает от 8,2 до 16,8 кг/ч, т.е. в 2,05 раза, а  $g_e$  снижается до 208 г/(кВт·ч). При этом  $g_e$  на режимах малых нагрузок при работе по газодизельному процессу выше, но при  $p_a$  большем 0,7 МПа  $g_e$  газодизеля становится ниже, чем при работе на ДТ. Соответственно, эффективный КПД  $\eta_e$ , определяющий степень использования теплоты, у газодизеля при  $p_a$  меньших 0,7 МПа имеет меньшее значение по сравнению с дизельным вариантом и

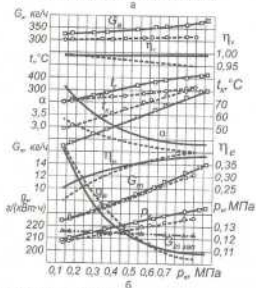
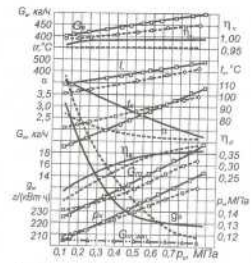


Рисунок 3.2 - Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$  п.к.в.: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

становится выше при  $p_0$  большем 0,7 МПа. Давление  $p_r$  наддувочного воздуха при возрастании нагрузки повышается с 0,118 до 0,161 МПа, т.е. на 36,4 %.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс на номинальном режиме работы (т.е.  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_r = 0,84 \text{ МПа}$ ) часовой расход воздуха  $G_a$  снижается с 490 до 450 кг/ч, т.е. на 8,2 %, температура  $t_e$  снижается с 480 до 420°C, т.е. на 12,5 %, температура  $t_i$  снижается со 103 до 98°C, т.е. на 4,9 %, коэффициент  $\alpha$  снижается с 1,8 до 1,6 (на 11,1 %), а эффективный КПД  $\eta_e$  при этом возрастает от 0,36 до 0,38, т.е. на 5,6 %, а  $G_e$  снижается с 18,6 до 16,8 кг/ч, т.е. на 9,7 %. Давление  $p_r$  при переходе на газодизельный процесс снижается с 0,17 до 0,16 МПа, т.е. на 5,9 %. При этом  $g_e$  снижается с 218 до 208 г/(кВт·ч), т.е. на 5 %. Величина запальной порции ДТ изменяется в диапазоне от 3,0 до 2,8 кг/ч (снижение на 6,7 %).

На рис. 3.2,б представлено изменение эффективных показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

При работе по дизельному процессу изменение нагрузки составляло от 0,13 до 0,92 МПа. Основные зависимости изменения рассматриваемых показателей от нагрузки на этом режиме сохраняются. Расход воздуха при увеличении нагрузки монотонно возрастает от 325 до 380 кг/ч, т.е. на 16,9 %, коэффициент наполнения  $\eta$  цилиндров находится в пределах 0,98...0,99 во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок, температура  $t_e$  ОГ возрастает от 200 до 430°C, т.е. в 2,15 раза, температура  $t_i$  наддувочного воздуха возрастает с 35 до 80°C, т.е. в 2,3 раза. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при этом снижается от 4,7 до 2,3, т.е. в 2,04 раза, а эффективный КПД  $\eta_e$  возрастает с 0,25 до 0,38, т.е. на 52 %, часовой расход  $G_e$  топлива возрастает от 5 до 14 кг/ч, т.е. в 2,8 раза, а удельный эффективный расход топлива  $g_e$  при этом снижается до 198 г/(кВт·ч). Давление  $p_r$  наддувочного воздуха при увеличении нагрузки повышается от 0,118 до 0,145 МПа, т.е. на 22,9 %.

При работе по газодизельному процессу при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и изменении нагрузки от 0,13 до 0,85 МПа часовой расход воздуха  $G_a$  возрастает от 300 до 320 кг/ч, т.е. на 6,7 %. Следует отметить некоторое снижение коэффициента наполнения  $\eta$  цилиндров

ров от 0,99 до 0,95, т.е. на 4 % при увеличении нагрузки. Температура  $t_1$  ОГ возрастает от 200 до 340°C, т.е. в 1,7 раза, температура  $t_2$  наддувочного воздуха возрастает с 48 до 84°C, т.е. в 1,75 раза. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при этом снижается от 3,3 до 2,0, т.е. в 1,65 раза, эффективный КПД  $\eta_e$  возрастает с 0,20 до 0,40, т.е. в 2,0 раза, часовой расход  $G_0$  топлива возрастает от 5 до 12,3 кг/ч, т.е. в 2,5 раза, а  $g_e$  снижается до 195 г/(кВт·ч). При этом  $g_e$  на режимах малых нагрузок при работе по газодизельному процессу выше, но при  $p_e$  больше 0,5 МПа  $g_e$  газодизель становится ниже, чем при работе на ДТ. Давление  $p_e$  наддувочного воздуха при увеличении нагрузки возрастает с 0,115 до 0,137 МПа, т.е. на 19,1 %. Величина запальной порции  $G_{z, \text{шт}}$  ДТ при этом снижается от 3,1 до 2,9 кг/ч, т.е. на 6,5 %.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  часовой расход воздуха  $G_a$  снижается с 375 до 320 кг/ч, т.е. на 14,7 %, температура  $t_1$  ОГ снижается с 420 до 320°C, т.е. на 23,8 %, температура  $t_2$  возрастает с 76 до 83°C, т.е. на 9,2 %, коэффициент  $\alpha$  снижается с 2,3 до 2,0 (на 13 %), эффективный КПД  $\eta_e$  при этом возрастает от 0,38 до 0,40, т.е. на 5,3 %, а  $G_0$  снижается с 13,5 до 12,2 кг/ч, т.е. на 9,6 %. Давление  $p_e$  при переходе на газодизельный процесс снижается с 0,143 до 0,137 МПа, т.е. на 4,2 %. При этом  $g_e$  снижается со 199 до 195 г/(кВт·ч), т.е. на 2 %. Коэффициент наполнения  $\eta_v$  при этом снижается с 0,99 до 0,95, т.е. на 4 %.

Нагрузочные характеристики дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при значениях установочного УОВТ 8 и 14° п.к.в. представлены на рис. 3.3,а и 3.3,б.

При анализе рассматриваемых графиков видно, что общая картина изменения показателей работы дизеля осталась прежней, однако эффективный к.п.д. при работе на КПГ на номинальном нагрузочном режиме ниже, чем для дизельного процесса при  $\Theta_{\text{уст}} = 8^\circ$  п.к.в., а значение удельного эффективного расхода топлива при газодизельном процессе лежит выше значений дизельного процесса во всем диапазоне изменения нагрузки. Расход запального ДТ остался на том же уровне.

Вместе с тем при  $\Theta_{\text{уст}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $p_e > 0,75 \text{ МПа}$  кривая удельного эффективного расхода  $g_e$  топлива при газодизельном

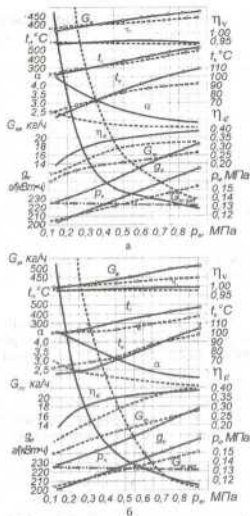


Рисунок 3.3 - Влияние применения природного газа на эффективные показатели работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ : а -  $\Theta_{\text{уст}} = 8^\circ$  п.к.в.; б -  $\Theta_{\text{уст}} = 14^\circ$  п.к.в.

— — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс;  
 ..... расход запальной ДТ

процессе проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса (так, при  $p_e = 0,84$  МПа значение  $g_{e \min}$  на 2 % меньше для газодизеля:  $g_{e \min} = 208$  г/кВт·ч).

Часовой расход  $G_f$  топлива на малых нагрузках при газодизельном процессе несколько выше значений дизельного процесса, но при  $p_e > 0,75$  МПа снижается на 1...10 % по сравнению с дизельным процессом.

Расход  $G_b$  воздуха на газодизельном процессе несколько ниже, чем на дизельном процессе при значении нагрузки  $p_e > 0,3$  МПа. Вместе с тем при работе на газообразном топливе с запальной порцией ДТ снижается значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  во всем диапазоне изменения нагрузки.

Таким образом, проведенный анализ изменения эффективных показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при различных значениях установочного УОВТ позволяет еще раз убедиться в правильности выбора в качестве оптимального значения  $\Theta_{opt} = 11^\circ$  п.к.в.

### 3.3. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения

В соответствии с методикой стендовых испытаний, нами были проведены испытания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на эффективные показатели в зависимости от частоты вращения [335].

Изменения эффективных показателей работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{opt} = 11^\circ$  п.к.в. в зависимости от частоты вращения без регуляторной ветви представлены на рис. 3.4,а.

При работе по дизельному процессу при изменении частоты вращения  $n$  от 1200 до 2500 мин<sup>-1</sup> часовой расход  $G_b$  воздуха возрастает с 220 до 530 кг/ч, т.е. в 2,4 раза. Такое увеличение расхода воздуха связано с ростом производительности турбокомпрессора, что видно по графику изменения давления  $p_b$  наддувочного воздуха. Эффективная мощность  $N_e$  возрастает от 32 до 80 кВт

при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>, т.е. в 2,5 раза, а затем снижается до 72 кВт при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>. Значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  снижается от 2,1 до 1,8, т.е. на 14,3 %, значение  $p_b$  возрастает от 0,11 до 0,17 МПа, т.е. на 54,5 %, часовой расход  $G_f$  топлива при этом возрастает от 6,5 до 18,6 кг/ч при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>, т.е. в 2,9 раза, а затем незначительно снижается до 18 кг/ч. Удельный эффективный расход  $g_e$  топлива сначала снижается от 204 до 196 г/(кВт·ч) при  $n = 1500...1700$  мин<sup>-1</sup>, т.е. на 3,9 %, а затем возрастает до 222 г/(кВт·ч) при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, т.е. на 13,3 %. Температура  $t_b$  наддувочного воздуха возрастает от 50 до 103°C, т.е. в 2,1 раза. Температура  $t_{OG}$  дизеля возрастает с увеличением частоты вращения от 360 до 480°C, т.е. на 33,3 %.

При работе по газодизельному процессу при изменении частоты вращения от 1200 до 2500 мин<sup>-1</sup> часовой расход  $G_b$  возрастает с 180 до 470 кг/ч, т.е. в 2,6 раза. Эффективная мощность  $N_e$  возрастает от 30 до 80 кВт при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>, т.е. в 2,7 раза, а затем снижается до 77 кВт при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>. Значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  снижается от 1,8 до 1,6, т.е. на 11,1 %. Необходимо отметить, что двигатель с турбонаддувом работает при значительном обеднении смеси во всем диапазоне частот вращения.

При работе по газодизельному циклу суммарный коэффициент избытка воздуха ниже, что связано с замещением части воздушного заряда, поступающего в цилиндры природным газом. Давление  $p_b$  наддувочного воздуха возрастает от 0,104 до 0,160 МПа, т.е. на 53,8 %, часовой расход  $G_f$  топлива возрастает от 5,1 до 17 кг/ч при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, т.е. в 3,3 раза. Удельный эффективный расход  $g_e$  топлива сначала снижается от 195 до 192 г/(кВт·ч) при  $n = 1600$  мин<sup>-1</sup>, т.е. на 1,5 %, а затем возрастает до 214 г/(кВт·ч) при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, т.е. на 11,5 %. Температура  $t_b$  наддувочного воздуха возрастает от 47 до 100°C, т.е. в 2,1 раза. Температура  $t_{OG}$  газодизеля возрастает от 300 до 400°C, т.е. на 25 %.

Величина запальной порции ДТ при увеличении частоты вращения возрастает с 1,8 до 3,2 кг/ч, что объясняется ростом числа циклов в единицу времени, а также повышением стабильности работы ТПА и снижением гидравлических потерь с увеличением частоты вращения.



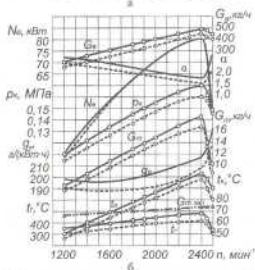
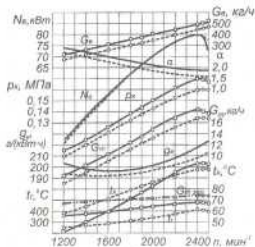


Рисунок 3.4 - Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при  $\Theta_{\text{нр}} = 11^{\circ}$  п.к.в.:

а - регулятор выключен; б - регулятор включен;

— - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Изменение эффективных показателей работы наддувного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{нр}} = 11^{\circ}$  п.к.в. в зависимости от частоты вращения при включенном регуляторе представлены на рис. 3.4,б.

Основные зависимости рассматриваемых показателей при включенном регуляторе сохраняются. Однако при превышении частоты вращения номинального значения происходит выключение подачи топлива регулятором, что приводит к резкому падению мощности двигателя, и соответственно часового расхода топлива. Это, в свою очередь, вызывает рост удельного эффективного расхода топлива и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Следует отметить, что степень коррекции подачи топлива на данной модификации двигателя на режиме максимального крутящего момента составляет не более 6%, поэтому на графике не наблюдается характерных изменений поведения кривых основных показателей.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОУДЕЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5

##### 4.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели и характеристики теплоуделения в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в.

Индикаторные показатели дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в., частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и номинальной нагрузке ( $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ) представлены на рис. 4.1.а.

Из представленных показателей видно, что при работе по газодизельному процессу увеличивается угол, соответствующий ПЗВ (на 27%), а также возрастает максимальное давление  $p_{2\text{max}}$  газов в цилиндре. Если для дизельного процесса максимальное давление  $p_{2\text{max}}$  газов в цилиндре составляет 9,7 МПа, то при газодизельном процессе оно составляет уже 10,6 МПа. Угол наклона кривой изменения давления газов в цилиндре увеличивается, что свидетельствует о возрастающей «жесткости» процесса сгорания в цилиндре газодизеля. На линии расширения кривая изменения давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса [333, 337].

Индикаторные показатели дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при значении установочного УОВТ  $11^\circ$  п.к.в., частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и номинальной нагрузке представлены на рис. 4.1.б.

Для этой диаграммы характерно большее максимальное давление  $p_{2\text{max}}$  газов в цилиндре и «жесткость» процесса сгорания, смещение точки максимального давления газов в цилиндре в сторону в.м.т. по сравнению с предыдущим графиком. При газодизельном процессе также увеличивается угол  $\phi$ , соответствующий ПЗВ, на 13,3% по сравнению с дизельным процессом, возрастает максимальное давление  $p_{2\text{max}}$  газов в цилиндре на 9,8% и составляет 11,2 МПа против 10,2 МПа для дизеля.

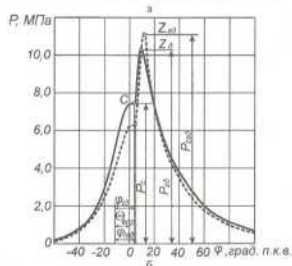
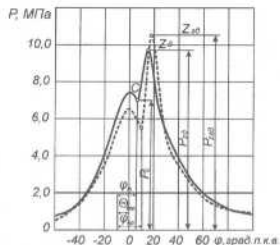


Рисунок 4.1 - Влияние применения природного газа на индикаторные показатели дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5;

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в.;  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ;

б -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.;  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Индикаторные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 4.2,а.

При работе по газодизельному процессу возрастает максимальное давление  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре. Так, для дизельного процесса максимальное давление  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре составляет 11 МПа, а для газодизельного процесса уже 12 МПа.

Угол наклона кривой изменения давления газов в цилиндре увеличивается, что свидетельствует о возрастающей «жесткости» процесса сгорания в цилиндре газодизеля. На линии расширения кривая давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Индикаторные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при значении установочного УОВТ  $11^\circ$  п.к.в. и частоте вращения  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 4.2,б.

Общие закономерности изменения кривой давления  $p_z$  газов в цилиндре в зависимости от изменения угла п.к.в., рассмотренные для  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ , характерны и для этого режима.

При переходе на газодизельный процесс повышается максимальное давление  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре (на 6,5 %), возрастает «жесткость» процесса сгорания (на 15,9 %), увеличивается угол, соответствующий ПЗВ (на 6,7 %), при расширении кривая изменения давления газов в цилиндре при газодизельном процессе лежит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Вместе с тем происходит смещение точки максимального давления газов в цилиндре в сторону от а.м.т. на  $4^\circ$  п.к.в. по сравнению с дизельным процессом [333, 337].

Графики динамики выделения теплоты, осредненной температуры газов в цилиндре, скорости отвода теплоты и полезного выделения теплоты в зависимости от угла п.к.в. дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 4.3,а.

При этом значение установочного УОВТ составляет  $8^\circ$  п.к.в. при номинальной нагрузке.

При рассмотрении представленных графиков видно, что при работе по газодизельному процессу резко увеличивается (почти в 1,5 раза) скорость активного тепловыделения и достигает 0,118

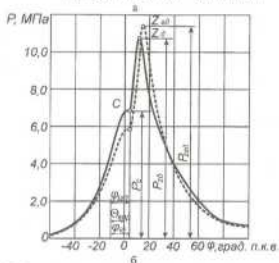
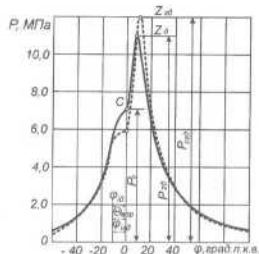


Рисунок 4.2 - Влияние применения природного газа на индикаторные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5:

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.;  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ ;

б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.;  $p_e = 0,92 \text{ МПа}$ ;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

(против 0,08 для дизеля), изменяется характер протекания кривых скорости выделения теплоты и активного выделения теплоты. При этом для газодизеля происходит увеличение значения максимальной средней температуры газов в цилиндре на 20 % (до 2400 К), смещение угла, соответствующего максимальному значению температуры, в сторону от в.м.т. на 4° п.к.в. по сравнению с дизельным процессом.

Вместе с тем наблюдается рост величины активного выделения теплоты при максимальной средней температуре газов в цилиндре и максимальном давлении:  $\chi_1 T_{max} = 0,76$  (на 27 % выше значения дизельного процесса),  $\chi_{p_{max}} = 0,66$  (на 32 % выше для газодизельного процесса).

Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\Theta_{кр} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$  и номинальной нагрузке представлены на рис. 4.3.6.

По сравнению с предыдущим графиком при газодизельном процессе повышается динамика выделения теплоты, а характер протекания остальных кривых остается аналогичным рассмотренному выше. Скорость активного тепловыделения для газодизеля возрастает на 44 % и достигает 0,13, на 3° п.к.в. по сравнению с дизельным процессом увеличивается угол, соответствующий достижению максимальной средней температуры, наблюдается рост величины активного выделения теплоты при максимальной средней температуре газов в цилиндре и максимальном давлении:  $\chi_1 T_{max} = 0,79$  (на 23 % выше для газодизеля),  $\chi_{p_{max}} = 0,69$  (на 31 % выше значения дизельного процесса).

Характеристики тепловыделения в зависимости от угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{кр} = 14^\circ \text{ п.к.в.}$  представлены на рис. 4.4.

При рассмотрении представленных графиков видно, что при работе по газодизельному процессу увеличивается максимальная скорость выделения теплоты на 40 % ( $d\chi/d\varphi_{max} = 0,14$ ), изменяется характер протекания кривых скорости отвода теплоты и полезного выделения теплоты (значения указанных характеристик выше для газодизеля в рассматриваемом диапазоне изменения значений угла п.к.в.).

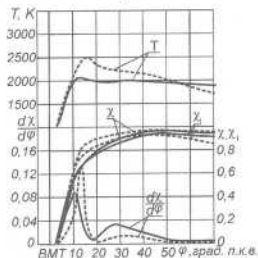
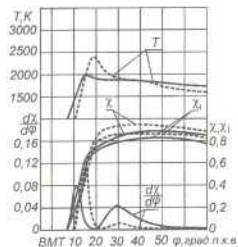


Рисунок 4.3 - Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ : а -  $\Theta_{кр} = 8^\circ \text{ п.к.в.}$ ; б -  $\Theta_{кр} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$ ;  
— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

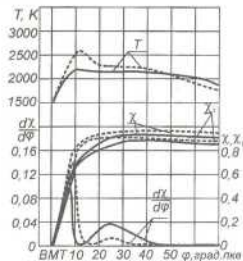


Рисунок 4.4 - Влияние применения природного газа на характеристику тепловыделения дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ;  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ \text{ п.к.в.}$ ;

— - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Для газодизельного процесса характерно увеличение максимальной осредненной температуры  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре на 18 % (до 2600 К), смещение угла, соответствующего максимальному значению температуры в сторону от в.м.т. на  $2^\circ \text{ п.к.в.}$  по сравнению с дизельным процессом. При этом необходимо отметить рост величины активного выделения теплоты при  $T_{\text{max}}$  и максимальном давлении:  $\chi_{T_{\text{max}}} = 0,82$  (на 21 % выше по сравнению с дизельным процессом),  $\chi_{p_{\text{max}}} = 0,74$  (на 32 % выше для газодизеля).

При анализе графиков характеристик тепловыделения дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента ( $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ), были выявлены аналогичные зависимости при различных значениях установочного УОВТ.

Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период, при работе по газодизельному процессу, приводит к сни-

жению доли потерь теплоты в этот период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование теплоты в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

#### 4.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

В соответствии с методикой стендовых испытаний нами были проведены испытания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на показатели процесса сгорания при различных значениях установочного УОВТ.

Показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения значения установочного УОВТ при номинальной частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  представлены на рис. 4.5, а.

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. При изменении значения установочного УОВТ с  $5^\circ$  до  $17^\circ \text{ п.к.в.}$  при работе по дизельному процессу максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла возрастает с 1730 до 2250 К, т.е. на 30,1 %. При этом максимальное давление  $p_{\text{max}}$  цикла возрастает от 9,2 до 11,8 МПа, т.е. на 28,3 %. Соответственно возрастает и максимальная скорость нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$  в цилиндре. Если при  $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ \text{ п.к.в.}$   $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,65 \text{ МПа/градус}$ , то при  $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ \text{ п.к.в.}$  значение  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$  составляет уже 1,25 МПа/градус, т.е. возрастает в 1,9 раза. Угол  $\phi$ , соответствующий ПЗВ, при этом снижается с  $16^\circ$  до  $14^\circ \text{ градусов}$ , т.е. на 12,5 %.

При работе по газодизельному процессу показатели процесса сгорания рассматривались нами при изменении  $\Theta_{\text{впр}}$  от  $5^\circ$  до  $14^\circ \text{ п.к.в.}$  При больших значениях  $\Theta_{\text{впр}}$  недопустимо возрастает  $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ , что делает работу двигателя невозможной.

При изменении  $\Theta_{\text{впр}}$  от  $5^\circ$  до  $14^\circ \text{ п.к.в.}$  максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла возрастает с 2270 до 2600 К, т.е. на 14,5 %,

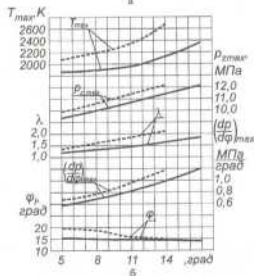
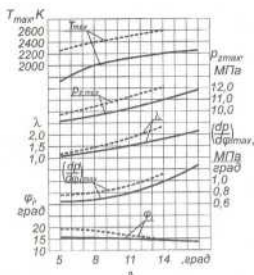


Рисунок 4.5 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ; — - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

$p_{z \max}$  возрастает от 9,8 до 12,0 МПа, т.е. на 22,4 %,  $(dp/d\phi)_{\max}$  возрастает с 0,76 до 1,12 МПа/градус, т.е. в 1,5 раза. При этом угол  $\phi$  снижается с 19 до 14 градусов, т.е. на 26,3 %.

Заводом-изготовителем установлено, что максимальная «жесткость» процесса сгорания не должна превышать 0,95 МПа/градус. Таким образом, установочный УОВТ  $11^\circ$  п.к. является оптимальным для дизельного и газодизельного процессов при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ . При этом значении установочного УОВТ максимальная «жесткость» процесса сгорания при работе по газодизельному процессу составляет 0,9 МПа/градус, что находится в допустимых пределах для данного двигателя.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при значении установочного УОВТ  $\phi_{\text{уп}} = 11^\circ$  п.к. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ , при  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  максимальная температура  $T_{\max}$  цикла возрастает с 2100 до 2500 К (на 19 %), максимальное давление  $p_{z \max}$  газов в цилиндре повышается с 10,2 до 11,2 МПа, т.е. рост составляет 9,8 %, максимальная «жесткость»  $(dp/d\phi)_{\max}$  процесса сгорания при этом возрастает с 0,8 до 0,9 МПа/градус (на 12,5 %), угол  $\phi$ , соответствующий ПЗВ возрастает с 15 до 17 градусов (на 13,3 %).

Такое изменение показателей процесса сгорания связано с тем, что природный газ имеет более высокую теплоту сгорания, чем ДТ, а также более высокую скорость сгорания в связи с тем, что в цилиндре газодизеля сгорает более однородная смесь, чем при сжигании ДТ.

На рис. 4.5,б представлены показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при частоте вращения  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,92 \text{ МПа}$  для дизельного процесса и  $p_e = 0,85 \text{ МПа}$  для газодизельного, соответствующей режиму максимального крутящего момента при работе на ДТ и при работе на природном газе.

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. При изменении значения установочного УОВТ с 5 до  $17^\circ$  п.к. при работе по дизельному процессу максимальная температура  $T_{\max}$  цикла возрастает с 1880 до 2360 К, т.е. на 25,5 %. При этом максимальное давление  $p_{z \max}$  газов в цилиндре возрастает от 9,4 до 12,1 МПа, т.е. на 28,7 %. Соответ-

венно возрастает и  $(dp/d\varphi)_{\max}$ . Если при  $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ$  п.к.в. значение  $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,59$  МПа/градус, то при  $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$  п.к.в. значение  $(dp/d\varphi)_{\max}$  равняется уже 1,2 МПа/градус, т.е. возрастает в 2,03 раза. Угол  $\varphi$ , соответствующий ПЗВ, при этом снижается с 16 до 14 градусов, т.е. на 12,5 %.

При работе по газодизельному процессу показатели процесса сгорания рассматривались нами при изменении  $\Theta_{\text{впр}}$  от 5 до  $14^\circ$  п.к.в. При больших значениях  $\Theta_{\text{впр}}$   $(dp/d\varphi)_{\max}$  превышает допустимые значения, что делает работу двигателя невозможной. При изменении значения  $\Theta_{\text{впр}}$  от 5 до  $14^\circ$  п.к.в. максимальная температура  $T_{\max}$  цикла возрастает с 2090 до 2690 К, т.е. на 28,7 %,  $p_{2\max}$  возрастает от 9,9 до 12,2 МПа, т.е. на 23,2 %,  $(dp/d\varphi)_{\max}$  возрастает с 0,7 до 1,2 МПа/градус, т.е. на 71,4 %. При этом угол  $\varphi$  снижается с 20 до 15 градусов, т.е. на 25 %.

Таким образом, исходя из полученных результатов, нами в качестве установочного УОВТ для работы по дизельному и газодизельному процессам на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  также был выбран установочный  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. При этом значении установочного УОВТ при переходе с дизельного на газодизельный процесс максимальная температура  $T_{\max}$  цикла возрастает с 1960 до 2350 К, т.е. на 19,9 %, максимальное давление  $p_{2\max}$  цикла возрастает от 10,8 до 11,5 МПа, т.е. на 6,5 %,  $(dp/d\varphi)_{\max}$  возрастает с 0,82 до 0,95 МПа/градус, т.е. на 15,9 %, угол  $\varphi$  возрастает с 15 до 16 градусов, т.е. на 6,7 %.

То есть сжигание в цилиндре дизеля с турбонаддувом природного газа позволяет повысить теплотворную способность топлива и скорость сгорания топливоздушную смесь, а следовательно и максимальную температуру  $T_{\max}$  цикла и максимальное давление  $p_{2\max}$  газов в цилиндре. Однако, с другой стороны, это приводит к возрастанию «жесткости» процесса сгорания и нагрузки на детали ЦПГ. Поэтому установка более раннего УОВТ не рекомендуется из-за чрезмерно «жесткой» работы двигателя. Установка более позднего по сравнению с оптимальным УОВТ приводит к смещению процесса сгорания вправо от в.м.т. и дефорсированию двигателя.

Анализ характеристик тепловыделения в цилиндре дизеля при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  позволяет отметить, что при работе по газоди-

зельному процессу при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. возрастает значение максимума скорости активного тепловыделения. Так, при газодизельном процессе значение  $(dx/d\varphi)_{\max}$  составляет 0,14, а при дизельном процессе всего 0,1 (рис. 4.6.а).

Вместе с тем, для газодизеля на  $1^\circ$  п.к.в. увеличивается значение угла, соответствующего максимальной осредненной температуре  $T_{\max}$ , наблюдается рост величины полезного выделения теплоты при максимальной осредненной температуре газов в цилиндре и максимальном давлении  $p_{2\max}$ :  $\chi_{T_{\max}} = 0,82$  (на 19 % выше значения дизельного процесса),  $\chi_{p_{2\max}} = 0,74$  (на 30 % выше значения для дизельного процесса).

При  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. скорость активного тепловыделения при газодизельном процессе возрастает на 44 % и составляет 0,13. Увеличивается значение величины активного выделения теплоты при максимальной осредненной температуре  $T_{\max}$  газов в цилиндре на 23 % ( $\chi_{T_{\max}} = 0,79$ ) и максимальном давлении на 31 % ( $\chi_{p_{2\max}} = 0,69$ ) на газодизельном процессе.

Значение угла  $\varphi_{23}$  при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. лежит выше значений дизельного процесса для газодизеля на  $4^\circ$  п.к.в. Вместе с тем значение угла  $\varphi_{23}$  при увеличении значения установочного УОВТ с 8 до  $14^\circ$  п.к.в. понижается для дизеля с 14 до  $10^\circ$  п.к.в. и с 18 до  $12^\circ$  п.к.в. для газодизеля.

С увеличением значения установочного УОВТ с 8 до  $14^\circ$  п.к.в. наблюдается рост величины полезного выделения теплоты при максимальной осредненной температуре  $T_{\max}$  газов в цилиндре с 0,60 до 0,68 на дизельном и с 0,76 до 0,82 на газодизельном процессе работы, а при максимальном давлении с 0,49 до 0,58 на дизельном и с 0,65 до 0,73 на газодизельном процессе.

Анализируя характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля (рис. 4.6.б) в зависимости от изменения значения установочного УОВТ при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ , необходимо отметить следующие закономерности.

При работе по газодизельному процессу и увеличении значения  $\Theta_{\text{впр}}$  возрастает максимум скорости активного тепловыделения. Если при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. его значение составляет 0,17 при газодизельном процессе, то при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. уже 0,21.

Также с увеличением значения установочного УОВТ с 8 до  $14^\circ$  п.к.в. наблюдается рост величины активного выделения теп-

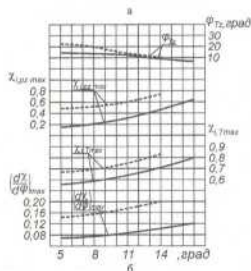
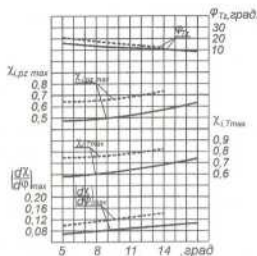


Рисунок 4.6 – Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения значения установочного УОВТ:

а – при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б – при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

лоты при максимальной осредненной температуре  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре с 0,6 до 0,7 на дизельном и с 0,7 до 0,84 на газодизельном процессе работы, значение угла  $\varphi_{\text{тз}}$  лежит выше значений дизельного процесса во всем рассматриваемом диапазоне изменения  $\Theta_{\text{уст}}$ .

Проведенный анализ позволяет отметить, что использование КПГ вызывает увеличение значений максимального давления  $P_{\text{max}}$  и температуры  $T_{\text{max}}$ , степени повышения давления  $\lambda$  и угла  $\varphi_{\text{с}}$  соответствующего ПЗВ, а также скорости и основных характеристик тепловыделения для рассматриваемых значений  $\Theta_{\text{уст}}$ . При большей длительности ПЗВ возрастает количество топлива, введенного к моменту воспламенения, то есть улучшается однородность смеси и степень ее химической подготовки к самовоспламенению.

Таким образом, увеличение значений показателей процесса сгорания и тепловыделения для газодизеля на всех исследуемых углах объясняется в первую очередь тем, что при работе на КПГ увеличивается угол, соответствующий ПЗВ, то есть процесс сгорания происходит в меньший период времени и более интенсивно. В результате оценки влияния значения установочного УОВТ на эффективные показатели и показатели процесса сгорания для частот вращения  $2400$  и  $1900 \text{ мин}^{-1}$  и с точки зрения быстрого перевода дизеля на использование КПГ без изменения  $\Theta_{\text{уст}}$  было установлено оптимальное значение установочного УОВТ для работы двигателя по газодизельному процессу.

#### 4.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

В соответствии с разработанной методикой проведения стендовых исследований были проведены испытания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения КПГ на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения при различных значениях установочного УОВТ.

Исследования влияния применения КПГ на показатели ра-



боты двигателя проводились при трех значениях  $\Theta_{\text{впр}}$ : 8, 11 и  $14^\circ$  п.к.в.

Показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от изменения нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в. представлены на рис. 4.7,а.

Анализируя графики, необходимо отметить, что при газодизельном процессе и  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  на 13 % увеличивается максимальное давление  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре и на 18 % степень повышения давления  $\lambda$ , при этом с увеличением нагрузки значения максимального давления  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре дизеля и степень повышения давления  $\lambda$  возрастают.

Максимальная осредненная температура  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре превышает значения дизельного процесса при всех значениях среднего эффективного давления (при  $p_e = 0,12 \text{ МПа}$  на 8 % (1650 К), при  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  (2400 К) на 20 %) и увеличивается с возрастанием нагрузки.

Значение угла  $\phi_i$ , соответствующего ПЗВ, при газодизельном процессе выше во всем диапазоне изменения нагрузки (при  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  на 12 %).

«Жесткость» процесса сгорания для дизеля увеличивается при возрастании нагрузки от минимального значения при минимальной нагрузке (0,62 МПа/градус при  $p_e = 0,12 \text{ МПа}$ ) до максимального значения (0,7 МПа/градус при  $p_e = 0,92 \text{ МПа}$ ). Для газодизеля при  $p_e = 0,12 \text{ МПа}$  максимальная «жесткость» процесса сгорания составляет 0,65 МПа/градус, а при нагрузке 0,84 МПа максимальная «жесткость» процесса сгорания составляет уже 0,8 МПа/градус.

Характер изменения показателей процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от изменения нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. (рис. 4.7,б) аналогичен рассмотренному выше. Однако имеют большие значения (по сравнению с  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в.) и увеличиваются максимальное давление  $p_{z, \text{max}}$  газов в цилиндре дизеля (на 9 %) и степень повышения давления  $\lambda$  (на 28 %) при газодизельном процессе и номинальной нагрузке.

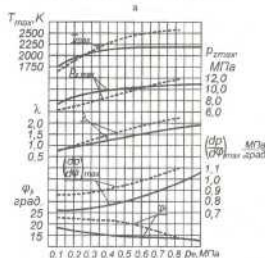
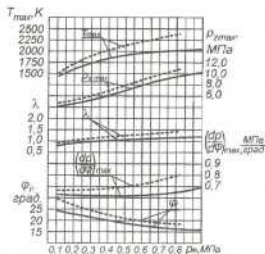


Рисунок 4.7 — Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ;

а —  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в., б —  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

При этом выявлено, что с увеличением нагрузки максимальное давление  $p_{2\max}$  газов в цилиндре дизеля возрастает и имеет большие значения при использовании КПГ для нагрузки  $p_e > 0,6$  МПа (при  $p_e = 0,84$  МПа  $p_{2\max} = 12$  МПа).

Для максимальной осредненной температуры  $T_{\max}$  газов в цилиндре характерно превышение значений дизельного процесса при значениях  $p_e > 0,25$  МПа (при  $p_e = 0,5$  МПа на 12 %, при  $p_e = 0,84$  МПа (2600 К) на 18 %).

Значение угла, соответствующего ПЗВ при газодизельном процессе, выше в диапазоне изменения нагрузки 0,1...0,8 МПа и имеет равные с дизельным процессом значения при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $p_e = 0,84$  МПа. Вместе с тем «жесткость» процесса сгорания увеличивается при возрастании нагрузки и имеет более высокие значения, чем при  $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$  п.к.в. и  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.

При дизельном процессе «жесткость» процесса сгорания снижается с максимального значения (0,98 МПа/градус при  $p_e = 0,84$  МПа) до минимального значения при минимальной нагрузке (0,73 МПа/градус при  $p_e = 0,12$  МПа).

Для газодизельного процесса при  $p_e = 0,12$  МПа максимальная «жесткость» процесса сгорания составляет 0,88 МПа/градус, а при номинальной нагрузке 0,84 МПа максимальное значение «жесткости» составляет уже 1,1 МПа/градус.

Очевидно, что «жесткость» работы при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. превышает установленные значения и накладывает ограничения на использование двигателя с данным значением установочного УОВТ.

Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при номинальной частоте вращения  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> представлено на рис. 4.8,а.

Анализ представленных графиков показывает, что при работе по дизельному процессу при возрастании нагрузки от 0,12 до 0,88 МПа максимальная температура  $T_{\max}$  цикла возрастает от 1550 до 2120 К, т.е. на 36,8 %, максимальное давление  $p_{2\max}$  газов в цилиндре возрастает с 6,5 до 10,3 МПа, т.е. на 58,5 %, значение  $(dp/d\phi)_{\max}$  возрастает от 0,69 до 0,82 МПа/градус, т.е. на 18,8 %, а угол  $\phi$ , соответствующий ПЗВ, снижается с 24 до 14 градусов, т.е. на 41,7 %.

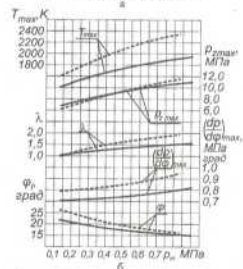
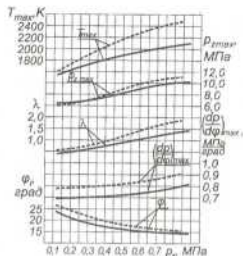


Рисунок 4.8 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.:

$a - n = 2400$  мин<sup>-1</sup>,  $б - n = 1900$  мин<sup>-1</sup>;

— - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

При работе по газодизельному процессу изменение нагрузки от 0,12 до 0,85 МПа приводит к возрастанию  $T_{max}$  от 1600 до 2500 К, т.е. на 56,3 %,  $p_{z,max}$  возрастает с 6 до 11,3 МПа, т.е. на 88,3 %, значение  $(dp/d\varphi)_{max}$  возрастает от 0,78 до 0,91 МПа/градус, т.е. на 16,7 %, при этом значение  $\varphi$  снижается с 27 до 16 градусов, т.е. на 40,7 %.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс на номинальном режиме работы ( $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_z = 0,84 \text{ МПа}$ ) значение  $T_{max}$  возрастает от 2100 до 2500 К (на 19 %), значение  $p_{z,max}$  возрастает при этом с 10,2 до 11,2 МПа (т.е. на 9,8 %), а  $(dp/d\varphi)_{max}$  возрастает с 0,8 до 0,9 МПа/градус (рост на 12,5 %), а значение  $\varphi$  снижается с 16 до 15 градусов, т.е. на 6,3 %.

На рис. 4.8,6 представлено влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

На частоте, соответствующей режиму максимального крутящего момента при работе по дизельному процессу при изменении нагрузки от 0,13 до 0,92 МПа значение  $T_{max}$  возрастает от 1400 до 1970 К, т.е. на 40,7 %, значение  $p_{z,max}$  возрастает с 7 до 11 МПа, т.е. на 57,1 %,  $(dp/d\varphi)_{max}$  возрастает с 0,7 до 0,82 МПа/градус, т.е. на 17,1 %, при этом  $\varphi$  снижается с 22 до 15 градусов, т.е. на 31,8 %.

При работе по газодизельному процессу при изменении нагрузки от 0,13 до 0,85 МПа значение  $T_{max}$  возрастает от 1600 до 2350 К (на 46,9 %), значение  $p_{z,max}$  возрастает с 6 до 11,5 МПа (на 91,7 %), значение  $(dp/d\varphi)_{max}$  с 0,79 до 0,95 МПа/градус (на 20,3 %), при этом значение  $\varphi$  снижается с 26 до 16 градусов (на 38,5 %). Необходимо отметить, что при работе по газодизельному процессу максимальная нагрузка ограничивалась при значении  $p_z = 0,85 \text{ МПа}$  из-за недопустимого повышения значения  $(dp/d\varphi)_{max}$  (более 1,0 МПа/градус).

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_z = 0,84 \text{ МПа}$  значение  $T_{max}$  возрастает от 1600 до 2350 К, т.е. на 46,9 %, максимальное давление  $p_{z,max}$  газов в цилиндре возрастает от 10,8 до 11,5 МПа, т.е. на 6,5 %, значение  $(dp/d\varphi)_{max}$  возрастает с 0,82 до 0,95 МПа/градус, т.е. на 15,9 %, а угол  $\varphi$  возрастает с 15 до 16 градусов, т.е. на 6,7 %.

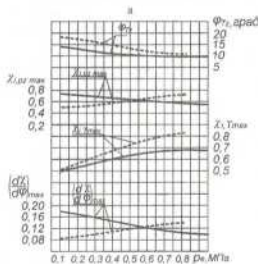
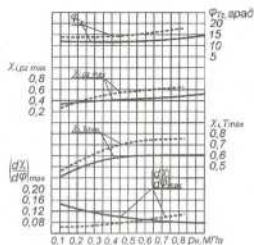


Рисунок 4.9 - Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ .

а -  $\Theta_{всп} = 8^\circ \text{ п.к.в.}$ , б -  $\Theta_{всп} = 14^\circ \text{ п.к.в.}$ ;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и установившемся УОВТ  $\Theta_{\text{уп}} = 8^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения нагрузки представлены на рис. 4.9,а.

Установлено, что при дизельном процессе работы максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается, а при газодизельном процессе увеличивается и имеет большие значения в области нагрузок  $p_c > 0,6 \text{ МПа}$  (при  $p_c = 0,2 \text{ МПа}$   $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,07$ , при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,13$ , при  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$   $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,11$ , а при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,08$ ). Вместе с тем графики активного выделения теплоты при максимальном давлении газов в цилиндре и максимальной температуре изменяются в сторону увеличения с ростом нагрузки, при этом значения для газодизельного процесса выше (для  $\chi_{\text{re max}}$  при  $p_c > 0,2 \text{ МПа}$ ). При значении  $p_c = 0,2 \text{ МПа}$  для газодизеля наблюдается увеличение величины  $\chi_{\text{Tmax}}$  на 15 % ( $\chi_{\text{Tmax}} = 0,55$ ), при  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  - увеличение  $\chi_{\text{Tmax}}$  на 25 % ( $\chi_{\text{Tmax}} = 0,75$ ),  $\chi_{\text{re max}}$  на 30 % ( $\chi_{\text{re max}} = 0,65$ ).

Значения  $\chi_{\text{re max}}$  для газодизеля несколько ниже при малых нагрузках (до  $p_c = 0,2 \text{ МПа}$ ), после чего наблюдается значительное увеличение. При газодизельном процессе значения угла  $\varphi_{\text{re}}$  лежат выше значений дизельного процесса (при  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  на 38 %:  $\varphi_{\text{re}} = 18$  градусов).

Аналогичный характер имеют кривые тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и установившемся УОВТ  $14^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения нагрузки (рис. 4.9,б).

При дизельном процессе максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается, а при газодизельном процессе увеличивается и имеет большие значения по сравнению с дизелем в области нагрузок  $p_c > 0,55 \text{ МПа}$  (при  $p_c = 0,2 \text{ МПа}$   $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,09$ , при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,17$ , при  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$   $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,14$ , а при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\text{max}} = 0,11$ ). Кривые активного выделения теплоты при максимальном давлении  $p_{\text{max}}$  газов в цилиндре и

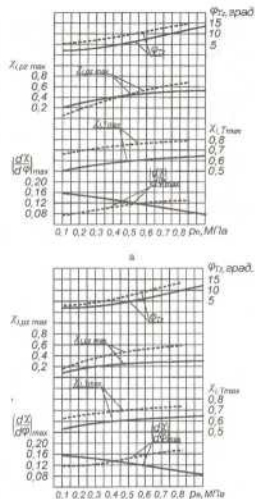


Рисунок 4.10 - Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{уп}} = 11^\circ$  п.к.в.:

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ , б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 — - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

максимальной температуре  $T_{\max}$  изменяются в сторону увеличения с ростом нагрузки, при этом значения для газодизельного процесса выше (при  $p_c = 0,2$  МПа  $\chi_{T_{\max}} = 0,57$  (на 7 % выше значения дизельного процесса), при  $p_c = 0,84$  МПа  $\chi_{T_{\max}} = 0,83$  (на 22 % выше),  $\chi_{p_{2\max}} = 0,71$  (на 20 % выше для газодизеля). Вместе с тем значения активного выделения теплоты при максимальном давлении газов в цилиндре для газодизеля несколько ниже при малых и средних нагрузках (до  $p_c = 0,53$  МПа), после чего наблюдается значительное увеличение. Значения угла  $\varphi_{\pi}$  при газодизельном процессе выше значений дизельного процесса (так, при  $p_c = 0,84$  МПа на 15 %:  $\varphi_{\pi} = 11,5^\circ$  п.к.в.).

Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> и установочном УОВТ 11° п.к.в. в зависимости от изменения нагрузки представлены на рис. 4.10,а.

Очевидно, что при газодизельном процессе характеристики тепловыделения несколько отличаются от характеристик тепловыделения дизельного процесса. Так, при дизельном процессе, максимум скорости активного тепловыделения с увеличением нагрузки снижается, а при газодизельном процессе увеличивается и имеет большие значения в области нагрузок  $p_c > 0,5$  МПа (при  $p_c = 0,2$  МПа значение  $(dy/d\varphi)_{\max} = 0,09$ , при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\max} = 0,15$ ; при  $p_c = 0,84$  МПа  $(dy/d\varphi)_{\max} = 0,13$ , а при дизельном процессе  $(dy/d\varphi)_{\max} = 0,1$ ).

Кривые активного выделения теплоты при максимальном давлении  $p_{2\max}$  в цилиндре и максимальной температуре  $T_{\max}$  изменяются в сторону увеличения с ростом нагрузки, при этом значения для газодизельного процесса выше (при  $p_c = 0,2$  МПа  $\chi_{T_{\max}} = 0,7$  (т.е. на 27 % выше), а при  $p_c = 0,84$  МПа  $\chi_{T_{\max}} = 0,79$  (на 23 % выше),  $\chi_{p_{2\max}} = 0,69$  (на 31 % выше для газодизеля). Значения активного выделения теплоты при максимальном давлении в цилиндре для газодизеля несколько ниже при малых нагрузках (до  $p_c = 0,4$  МПа), после чего наблюдается значительное увеличение. При газодизельном процессе значения угла  $\varphi_{\pi}$  увеличиваются по сравнению с дизельным процессом (при  $p_c = 0,84$  МПа на 25 %:  $\varphi_{\pi} = 15^\circ$  п.к.в.).

Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> и  $\Theta_{\text{оп}} = 11^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения нагрузки представлены на рис. 4.10,б.

Из графиков видно, что максимум скорости активного тепловыделения при газодизельном процессе лежит выше аналогичных значений дизельного процесса при больших нагрузках. Так, если при дизельном процессе эти значения при увеличении нагрузки снижаются, то при газодизельном процессе - возрастают.

Более высокие значения при газодизельном цикле работы характерны также и для активного выделения теплоты при максимальном давлении газов в цилиндре и максимальной температуре (при  $p_c = 0,2$  МПа  $\chi_{T_{\max}} = 0,65$  (на 18 % выше),  $\chi_{p_{2\max}} = 0,3$  (на 50 % выше), при  $p_c = 0,84$  МПа значения  $\chi_{T_{\max}} = 0,79$  (на 23 % выше),  $\chi_{p_{2\max}} = 0,69$  (на 31 % выше). При этом значения показателей увеличиваются с ростом нагрузки. Значения угла  $\varphi_{\pi}$  при использовании КПГ лежат выше значений дизельного процесса (так, при  $p_c = 0,84$  МПа на 40 %:  $\varphi_{\pi} = 14^\circ$  п.к.в.) и при увеличении нагрузки возрастают.

Таким образом, рассмотренные показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 с КС типа ЦНИДИ подтверждают выбор в качестве оптимального  $\Theta_{\text{оп}} = 11^\circ$  п.к.в. с точки зрения допустимой «жесткости» работы двигателя и эффективности процесса сгорания.

#### 4.4. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала

Показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{оп}} = 11^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 4.11,а.

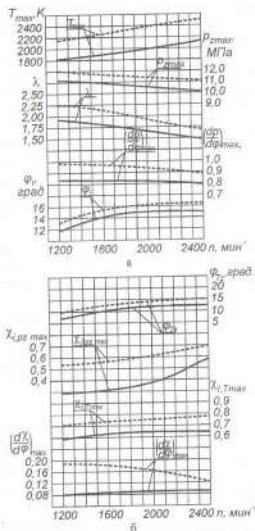


Рисунок 4.11 – Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при  $\Theta_{оп} = 11^\circ$  п.к.в.: — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс.

Анализируя графики, необходимо отметить, что значения всех показателей процесса сгорания при газодизельном процессе лежат выше значений дизельного процесса во всем диапазоне изменения частоты вращения. При этом максимальная скорость нарастания давления снижается с увеличением частоты вращения коленчатого вала и имеет большие значения для газодизельного процесса (так, при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$   $(\frac{dp}{d\phi})_{max} = 0,98$ , а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$   $(\frac{dp}{d\phi})_{max} = 0,9 \text{ МПа/градус}$ ). Характер изменения всех показателей при газодизельном процессе в зависимости от частоты вращения полностью повторяет характер изменения при дизельном процессе. Максимальное давление  $p_{zmax}$  газов в цилиндре газодизеля снижается с увеличением частоты вращения (если при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$   $p_{zmax} = 12,0 \text{ МПа}$ , то при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$   $p_{zmax} = 11,2 \text{ МПа}$ ). Максимальная осредненная температура  $T_{max}$  газов в цилиндре превышает значения дизельного процесса при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  на 20 % (2150 К), а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на 19 % (2500 К).

При газодизельном процессе угол, соответствующий ПЗВ, выше во всем диапазоне частоты вращения при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  на 11 % (13° п.к.в.), при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на 7 % (16° п.к.в.).

Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{оп} = 11^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 4.11,б.

В соответствии с представленными графиками необходимо отметить, что скорость активного тепловыделения при газодизельном процессе выше, чем при дизельном процессе во всем скоростном диапазоне: при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  на 25 % ( $(\frac{d\chi}{d\phi})_{max} = 0,18$ ), при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на 30 % ( $(\frac{d\chi}{d\phi})_{max} = 0,13$ ).

Увеличение значений характерно и для активного тепловыделения в характерных точках: максимальном давлении газов в цилиндре и максимальной осредненной температуре газов в цилиндре (при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$   $\chi_{Tmax} = 0,77$  (на 10 %),  $\chi_{гр max} = 0,67$  (на 39 %), при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$   $\chi_{Tmax} = 0,79$  (на 23 %),  $\chi_{гр max} = 0,69$  (на 31 %)).

Значения угла  $\phi_{zв}$  при газодизельном процессе выше, чем при дизельном процессе во всем диапазоне изменения частоты вращения (при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на 25 %:  $\phi_{zв} = 15$  градусов).

## 5. УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

### 5.1. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбоагрегатом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

В соответствии с методикой [327, 338, 339] стендовых испытаний нами были проведены испытания дизеля с турбоагрегатом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на его экологические показатели при различных значениях установочного УОВТ.

Зависимости содержания токсичных компонентов в ОГ наддувного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 от изменения значения установочного УОВТ при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузке  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  представлены на рис. 5.1,а.

Из изменения значений содержания оксидов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе по дизельному процессу видно, что при возрастании значения установочного УОВТ от 5 до 17° п.к.в. содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ возрастает от 180 до 188 ppm, т.е. на 4,4 %, содержание углеводородов  $\text{CH}$  при этом снижается с 0,03 до 0,008 %, т.е. в 3,75 раза, а дымность  $\text{O}_1$  снижается с 3,5 до 1,5 ед. по шкале Bosch, т.е. в 2,3 раза, в то же время содержание оксида углерода  $\text{CO}$  возрастает от 0,026 до 0,062 %, т.е. в 2,4 раза. Такое изменение содержания основных токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбоагрегатом объясняется возрастанием значений  $T_{\text{max}}$  и  $P_{\text{max}}$  при увеличении значения установочного УОВТ, а также изменением химического состава топлива.

При работе по газодизельному процессу при изменении значения установочного УОВТ от 5 до 14° п.к.в. при чистоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ возрастает от 170 до 174 ppm, т.е. на 2,4 %, содержание  $\text{CH}$  снижается с 0,37 до 0,20 %, т.е. в 1,85 раза, при этом дымность ОГ практически не меняется и находится в пределах 0,1...0,2 ед. по шкале Bosch, а содержание  $\text{CO}$  снижается с 0,075 до 0,035 %, т.е. в 2,1 раза.

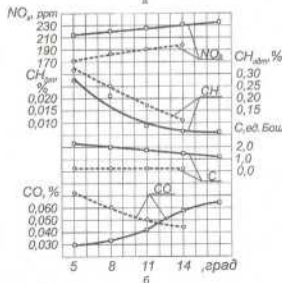
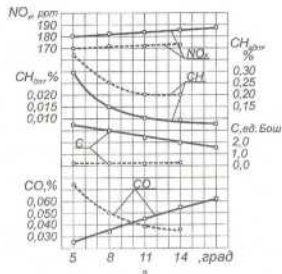


Рисунок 5.1 – Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбоагрегатом в зависимости от изменения установочного УОВТ: а –  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

Подобный характер изменения содержания основных токсичных компонентов в ОГ газодизеля с турбонаддувом можно объяснить снижением значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (см. рис. 3.2) и ростом значений  $T_{max}$  и  $p_{2max}$  при увеличении значения установочного УОВТ.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при значении установочного  $\Theta_{зпр} = 11^\circ$  п.к.в., принятого нами за оптимальный, и  $p_c = 0,84$  МПа содержание  $NO_x$  в ОГ снижается со 183 до 172 ppm, т.е. на 6 %, в то же время дымность ОГ снижается с 2,5 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 96 %, содержание СО снижается с 0,046 до 0,039 %, т.е. в 1,2 раза, а содержание СН в ОГ возрастает от 0,01 до 0,20 %, т.е. в 20 раз.

Такое значительное снижение дымности ОГ объясняется тем, что КПГ при своем сгорании практически не выбрасывает в ОГ сажи, а величина дымности ОГ газодизеля с турбонаддувом обусловлена в значительной степени наличием запальной порции ДТ. Работа же газодизеля при таком значительном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  (см. рис. 3.2) вызывает неполное сгорание топливоздушная смеси и срыв пламени в переобедненных зонах КС, а как следствие высокое содержание в ОГ несгоревших углеводородов СН.

На основании полученных данных, можно сделать вывод, что использование КПГ в качестве топлива позволяет существенно снизить дымность ОГ, а также содержание других токсичных компонентов, но при увеличении содержания СН в ОГ.

На рис. 5.1,6 представлено содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от значения установочного УОВТ при частоте вращения  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> и нагрузке, соответствующей максимальному крутящему моменту.

На режиме соответствующему максимальному крутящему моменту, при работе на дизельном процессе, при изменении значения установочного УОВТ от 5 до 17° п.к.в. содержание оксидов азота  $NO_x$  в ОГ меняется от 215 до 235 ppm, т.е. возрастает на 9,3 %, содержание СН снижается с 0,028 до 0,006 %, т.е. в 4,7 раза, дымность ОГ снижается с 2,4 до 1,2 ед. по шкале Bosch, т.е. в 2 раза, а содержание СО возрастает от 0,030 до 0,065 %, т.е. в 2,2 раза.

При переходе на газодизельный процесс изменение установочного УОВТ от 5 до 14° п.к.в. приводит к возрастанию содержания в ОГ оксидов азота  $NO_x$  от 173 до 200 ppm, т.е. на 15,6 %, снижению содержания СН с 0,32 до 0,11 %, т.е. в 2,9 раза, дымность ОГ газодизеля практически постоянна и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch, а содержание СО снижается с 0,073 до 0,045 %, т.е. в 1,6 раза.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $\Theta_{зпр} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> содержание  $NO_x$  в ОГ снижается с 225 до 190 ppm, т.е. на 15,6 %, дымность ОГ снижается с 1,8 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 94,4 %, содержание СО возрастает от 0,042 до 0,050 %, т.е. в 1,2 раза, а содержание СН возрастает от 0,01 до 0,17 %, т.е. в 17 раз.

Таким образом, можно отметить, что применение КПГ в качестве моторного топлива позволяет значительно снизить содержание в ОГ наиболее токсичных компонентов – оксидов азота  $NO_x$  и сажи С, при некотором увеличении выбросов СО и СН. Снижение же выбросов этих компонентов с ОГ является более простой технической задачей.

На основании анализа представленных графиков можно сделать вывод, что с точки зрения снижения токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном и газодизельном процессах оптимальным является установочный УОВТ, равный  $11^\circ$  п.к.в., так как на этом угле суммарная токсичность ОГ минимальная, а максимальная скорость нарастания давления газов  $(dp/d\phi)_{max}$  в цилиндре не превышает допустимых значений.

## 5.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах

В соответствии с методикой стендовых испытаний, нами были проведены испытания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на его экологические показатели на различных нагрузочных режимах.



Изменение экологических показателей наддувного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{дпр}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$  представлено на рис. 5.2,а.

Из представленных графиков видно, что при работе по дизельному процессу при увеличении нагрузки от 0,12 до 0,88 МПа содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ возрастает от 160 до 185 ppm, т.е. на 15,6 %, содержание углеводородов  $\text{CH}$  при этом снижается с 0,025 до 0,010 %, т.е. в 2,5 раза, дымность ОГ возрастает от 0,9 до 2,6 ед. по шкале Bosch, т.е. в 2,9 раза, при этом содержание оксида углерода  $\text{CO}$  сначала возрастает от 0,035 % при  $p_e = 0,12 \text{ МПа}$  до 0,049 % при  $p_e = 0,7 \text{ МПа}$ , т.е. на 40 %, а затем снижается до 0,047 % при  $p_e = 0,88 \text{ МПа}$ .

При работе по газодизельному процессу при изменении нагрузки от 0,12 до 0,85 МПа содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ возрастает от 165 до 170 ppm, т.е. на 3 %, содержание  $\text{CH}$  снижается с 1,6 до 0,2 %, т.е. в 8 раз, дымность ОГ практически не изменяется и составляет около 0,1 ед. по шкале Bosch, а содержание  $\text{CO}$  сначала возрастает от 0,059 % при  $p_e = 0,13 \text{ МПа}$  до 0,066 % при  $p_e = 0,3 \text{ МПа}$ , т.е. на 11,9 %, а затем снижается до 0,039 % при  $p_e = 0,85 \text{ МПа}$ , т.е. на 40,9 %.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при номинальной нагрузке  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  и значении установившегося  $\Theta_{\text{дпр}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$ , принятого нами за оптимальный, содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снижается со 183 до 170 ppm, т.е. на 8 %, дымность снижается с 2,5 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 96 %, содержание  $\text{CO}$  снижается с 0,047 до 0,039 %, т.е. в 1,2 раза, при этом содержание  $\text{CH}$  в ОГ возрастает от 0,01 до 0,20 %, т.е. в 20 раз.

Следует отметить, что при переходе на газодизельный процесс возрастает содержание углеводородов  $\text{CH}$  в ОГ в несколько раз, особенно на режиме малой нагрузки. Это связано с тем, что при значительном обеднении смеси на режимах малых нагрузок ухудшается процесс сгорания топливозоудушной смеси. При этом происходит увеличение процентного содержания продуктов неполного сгорания в ОГ. Также при работе по газодизельному процессу возрастает содержание оксида углерода  $\text{CO}$  в ОГ, особенно на режимах малых нагрузок.

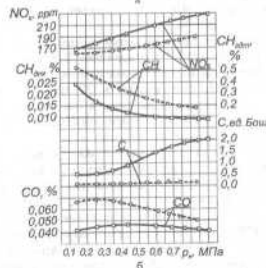
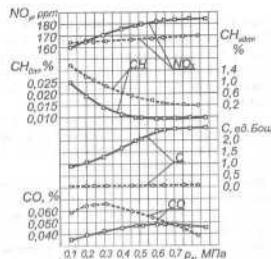


Рисунок 5.2 - Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{дпр}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$ :

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;

— — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

Так, при  $p_c = 0,13$  МПа содержание CO в ОГ дизеля составляет 0,035 %, а газодизеля – 0,059 %, что на 63,9 % больше. Однако при  $p_c = 0,7$  МПа содержание CO в ОГ дизеля и газодизеля становится практически одинаковым, а при дальнейшем увеличении нагрузки содержание CO в ОГ газодизеля становится меньше, чем у дизеля.

Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> и  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. представлено на рис. 4.5.б.

При работе по дизельному процессу при изменении нагрузки от 0,13 до 0,92 МПа содержание NO<sub>x</sub> в ОГ возрастает от 169 до 230 ррп, т.е. на 36,1 %, содержание СН снижается с 0,024 до 0,008 %, т.е. в 3 раза, дымность ОГ возрастает от 0,5 до 2,0 ед. по шкале Bosch, т.е. в 4 раза, содержание CO сначала возрастает, достигая максимума 0,047 % при  $p_c = 0,45$  МПа, а затем плавно снижается и при  $p_c = 0,92$  МПа составляет уже 0,041 %, т.е. снижение составило 12,8 %.

При работе по газодизельному процессу при изменении нагрузки от 0,13 до 0,85 МПа содержание NO<sub>x</sub> в ОГ возрастает от 166 до 190 ррп, т.е. на 14,5 %, содержание СН снижается с 0,53 до 0,17 %, т.е. в 3,1 раза, дымность ОГ газодизеля практически постоянна и не зависит от нагрузки и составляет 0,1...0,2 ед. по шкале Bosch, содержание CO при этом снижается с 0,066 до 0,050 %, т.е. в 1,3 раза.

При  $p_c = 0,84$  МПа содержание NO<sub>x</sub> при переходе с дизельного на газодизельный процесс снижается с 228 до 190 ррп, то есть на 16,7 %, содержание CO возрастает с 0,042 до 0,050 %, то есть на 19 %. Дымность ОГ снижается с 2 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 95 %, при этом содержание СН в ОГ возрастает с 0,009 до 0,17 %, т.е. в 18,8 раза. Такое значительное снижение содержания сажи в ОГ газодизеля можно объяснить тем, что газодизель с турбонаддувом работает с высоким коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , сильной турбулентной зарядкой, обеспечивающей практически полное выгорание сажевых частиц в зонах КС с высокой температурой и избытком окислителя. Проблему повышенного содержания в ОГ углеводородов СН можно решить путем установки каталитического нейтрализатора ОГ.

### 5.3. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения

В соответствии с методикой стендовых испытаний, нами были проведены испытания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на экологические показатели в зависимости от частоты вращения.

На рис. 5.3 представлено влияние применения природного газа на содержание основных токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом при работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от частоты вращения при различных значениях установочного УОВТ.

При работе по дизельному процессу изменение значения установочного УОВТ от 8 до 14° п.к.в. приводит к возрастанию содержания в ОГ окислов азота NO<sub>x</sub> при частоте вращения  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> с 252 до 270 ррп, т.е. на 7,1 % и практически выравнивается при повышении частоты вращения до  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, при которой содержание NO<sub>x</sub> в ОГ составляет около 183 ррп. При  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. увеличение частоты вращения от  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> до  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup> приводит к снижению содержания в ОГ NO<sub>x</sub> с 265 до 170 ррп, т.е. на 35,8 %.

При уменьшении  $\Theta_{\text{впр}}$  от 14 до 8° п.к.в. содержание углеводородов СН в ОГ возрастает во всем рассматриваемом диапазоне частот вращения. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в. содержание СН в ОГ меняется от 0,023 % при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> до 0,013 % при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, т.е. снижается в 1,8 раза. А при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. содержание СН в ОГ снижается от 0,012 до 0,007 % при увеличении частоты вращения от 1200 до 1900 мин<sup>-1</sup>, т.е. снижается в 1,7 раза, а затем возрастает до 0,010 %, т.е. в 1,4 раза. При  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. содержание СН в ОГ мало зависит от частоты вращения и составляет порядка 0,009...0,010 %.

При изменении значения установочного УОВТ прослеживается четкая зависимость изменения дымности ОГ дизеля. Чем больше установочный УОВТ, то есть раньше подается топливо, тем меньше дымность ОГ дизеля. При этом с увеличением частоты вращения содержание сажи в ОГ дизеля с турбонаддувом воз-

растает. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. при изменении частоты вращения от 1200 до 2500  $\text{мин}^{-1}$  дымность ОГ возрастает от 1,7 до 2,5 ед. по шкале Bosch, т.е. в 1,5 раза.

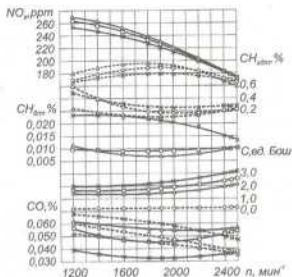


Рисунок 5.3 - Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения:

- $\times$  - дизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в.
- $\square$  - дизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.
- $\triangle$  - дизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.
- $\circ$  - газодизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в.
- $\diamond$  - газодизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.
- $\blacktriangle$  - газодизельный процесс,  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.

Содержание CO в ОГ дизеля также сильно зависит от значения установочного УОВТ. При  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. изменение частоты вращения от 1200 до 1900  $\text{мин}^{-1}$  приводит к снижению содержания CO от 0,057 до 0,046 %, т.е. в 1,2 раза, а затем возрастает до 0,055 % при  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ , т.е. в 1,2 раза.

При работе по газодизельному процессу содержание  $\text{NO}_x$  в

ОГ ниже, чем при работе на ДТ во всем диапазоне частот вращения. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. увеличение частоты вращения от  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  приводит к росту содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ от 170 до 190 ppm, т.е. на 11,8 %, а при дальнейшем повышении частоты вращения до 2500  $\text{мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снова снижается до 170 ppm, т.е. на 10,5 %. Содержание CH в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. содержание CH в ОГ снижается с 0,6 до 0,2 %, т.е. в 3 раза при повышении частоты вращения от 1200 до 2500  $\text{мин}^{-1}$ . Дымность ОГ газодизеля практически не зависит ни от частоты вращения, ни от значения установочного УОВТ. Для рассматриваемых режимов работы газодизеля она составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. Содержание оксида углерода CO в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. содержание CO в ОГ снижается с 0,060 до 0,038 %, т.е. в 1,6 раза при возрастании частоты вращения от 1200 до 2500  $\text{мин}^{-1}$ .

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ , принятого нами за оптимальный, содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снижается со 183 до 170 ppm, т.е. на 8 %, дымность ОГ снижается с 2,5 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 96 %, содержание CO снижается с 0,046 до 0,039 %, т.е. в 1,2 раза, при этом содержание CH в ОГ возрастает от 0,01 до 0,20 %, т.е. в 20 раз.

При  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.,  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  при переходе с дизельного на газодизельный процесс снижается с 225 до 190 ppm, то есть на 15,6 %, содержание CO возрастает с 0,042 до 0,050 %, то есть на 19 %. Дымность ОГ снижается с 2 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 95 %, при этом содержание CH в ОГ возрастает 0,010 до 0,17 %, т.е. в 17 раз.

На основании проведенных экспериментальных исследований по изучению влияния применения КПГ в качестве топлива на содержание основных токсичных компонентов в ОГ на различных нагрузочных и скоростных режимах работы можно сделать вывод, что использование КПГ позволяет значительно снизить дымность ОГ и несколько снизить содержание в них оксидов азота  $\text{NO}_x$  и оксида углерода CO. Но при этом возрастает содержа-

ние в ОГ углеводородов СН и диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Подобный характер протекания зависимости содержания токсичных компонентов ОГ от изменения нагрузки или частоты вращения обуславливается изменением химического состава топлива, а также скоростью протекания реакций окисления топлива в цилиндре двигателя и согласуется с теоретическими предпосылками.

Полученные результаты позволяют говорить о целесообразности применения природного газа в качестве моторного топлива с целью снижения количества вредных выбросов с ОГ, хотя при этом возникает проблема снижения содержания в ОГ углеводородов и диоксида углерода, вызывающих, по мнению ряда специалистов, так называемый «парниковый эффект».

## 6. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ПОКАЗАТЕЛИ САЖЕСОДЕРЖАНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5

### 6.1. Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в.

С помощью программы для определения массовой  $C$  и относительной  $g$  концентрации сажи в цилиндре дизеля нами была рассчитана массовая  $C$  и относительная  $g$  концентрации сажи в цилиндре дизеля и газодизеля с турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в.

На рис. 6.1 представлено влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбоадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. на номинальном режиме работы ( $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_b = 0,84 \text{ МПа}$ ) при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. [222].

Из представленных зависимостей видно, что начало видимого сгорания топлива начинается через  $2^\circ \dots 3^\circ$  после в.м.т. Воспламенение рабочей смеси приводит к интенсивному тепловыделению, и температура газов быстро достигает максимального значения: 2100 К при дизельном процессе и 2500 К при газодизельном. Результирующее сажесодержание в ОГ складывается из двух противоположно направленных процессов – образования и выгорания сажевых частиц. Преобладание какого-либо процесса на определенном участке процесса сгорания топливовоздушной смеси ведет к изменению концентрации сажи в ту или иную сторону.

Начало сажевыделения в цилиндре дизеля совпадает с началом видимого сгорания, то есть сажа образуется сразу же, как только появляется устойчивый фронт пламени. Результирующее сажесодержание складывается из трех этапов процесса сажеобразования.

На первом этапе происходит резкое возрастание массовой и относительной концентрации сажи в цилиндре дизеля в результате преобладающего влияния процесса сажеобразования над ее выгоранием. На этом участке пламя быстро распространяется на

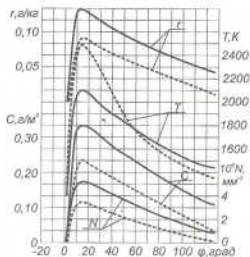


Рисунок 6.1 – Влияние применяемого природного газа на показатели сажеобразования и температуру в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{кр} = 11^\circ$  п.к.в.:  
 $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ ;  
 — — — — дизель; - - - - газодизель

весь объем подготовленной к сгоранию за ПЗВ смеси.

Образование сажи происходит преимущественно в ядре струи запального ДТ в результате термического и окислительно-го пиролиза топлива в условиях недостатка окислителя. На начальном этапе преобладающим механизмом сажеобразования является НГФМ. Быстрое расширение фронта пламени обуславливает увеличение количества топлива, сгорающего в этом фронте по диффузионному механизму, а следовательно, и соответствующий рост массового выхода сажи. В условиях повышенной турбулентности заряда основная масса образующейся сажи выносятся из пламени в зоны с относительно низкой температурой и избытком окислителя. В этих зонах начинается окисление сажевых частиц, но из-за низкой температуры процессы окисления замедлены и не могут конкурировать с процессами сажеобразования, поэтому массовая концентрация сажи в цилиндре быстро возрастает.

На втором этапе процесса сажеобразования пламенем охвачена большая часть объема и происходит диффузионное горение основной части заряда. Температура в цилиндре повышается до максимального значения, и процессы образования и выгорания сажи идут с соизмеримыми скоростями, но суммарное сажеосодержание продолжает увеличиваться. На этом участке основным механизмом образования сажи является ВТАМ. Образовавшиеся в результате физико-химических превращений топлива частицы сажи окисляются, так как температура газов и общий коэффициент избытка воздуха становятся достаточно высокими.

На третьем этапе процесс выгорания сажи доминирует над процессом образования. Сгорание основной массы заряда к этому времени завершилось, и возможно лишь догорание отдельных локальных объемов смеси и сажевых частиц. Работа дизеля с турбонадувом характеризуется значительным обеднением смеси даже на режимах высоких нагрузок и повышенной турбулентностью смеси в цилиндре двигателя. То есть создаются благоприятные условия для выгорания сажевых частиц. Этот процесс длится до открытия выпускных клапанов, а содержание сажи при этом снижается до значений, определяющих дымность ОГ.

При работе по дизельному процессу массовая концентрация  $C$  сажи достигает своего максимума в  $0,33 \text{ г/м}^3$  через  $15^\circ$  п.к.в. после в.м.т., после чего начинает снижаться, достигая к моменту открытия выпускного клапана величины  $0,11 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 3 раза.

В то же время при работе по газодизельному процессу  $C_{\text{max}} = 0,23 \text{ г/м}^3$ , а к моменту открытия выпускного клапана составляет всего  $0,03 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 7,7 раза.

Изменение относительной концентрации сажи в цилиндре двигателя в зависимости от угла п.к.в. аналогично изменению массовой концентрации. При работе по дизельному процессу максимальная относительная концентрация  $\tau$  сажи составляет  $0,133 \text{ г/кг}$ , а к моменту открытия выпускного клапана она составляет уже  $0,044 \text{ г/кг}$ , т.е. снижение составляет 66,9 %. При работе по газодизельному процессу максимальная относительная концентрация  $\tau$  сажи составляет  $0,093 \text{ г/кг}$ , а к моменту открытия выпускного клапана всего  $0,012 \text{ г/кг}$ , т.е. снижается в 7,7 раза.

Сильное влияние на излучательную способность и радиаци-

онные характеристики пламени оказывает количество сажевых частиц в единице объема реакции. При проведении расчетов по определению количества  $N$  частиц сажи в единице объема нами были приняты следующие допущения:

1. Полидисперсная система сажевых частиц представлена монодисперсной с эквивалентным модалным радиусом частиц 20 нм.

2. Плотность сажевых частиц не зависит от механизма образования и составляет  $1,9 \text{ г/см}^3$ .

На основании этих допущений расчетное максимальное количество сажевых частиц составляет  $5,2 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  для дизельного процесса и  $3,6 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  для газодизельного процесса. После достижения максимума при дальнейшем повороте коленчатого вала количество сажевых частиц снижается пропорционально снижению массовой концентрации. К моменту открытия выпускного клапана при работе по дизельному процессу количество частиц  $N$  сажи составляет уже  $1,7 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается на 67%, а при работе по газодизельному процессу количество частиц  $N$  сажи составляет  $0,4 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается на 88,9%.

Следует отметить, что при работе по газодизельному процессу значение  $T_{\text{max}}$  выше, чем при работе по дизельному процессу, но и скорость снижения температуры по углу п.к.в. тоже выше.

На рис. 6.2 представлено влияние применения природного газа на показатели сажесодержания  $C$ ,  $g$  и  $N$  и температуру  $T$  газов в цилиндре в зависимости от угла п.к.в. на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,92 \text{ МПа}$  для дизельного процесса и  $p_e = 0,85 \text{ МПа}$  – для газодизельного.

При работе по дизельному процессу  $C_{\text{max}}$  составляет  $0,31 \text{ г/м}^3$ , а к моменту открытия выпускного клапана она составляет  $0,07 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 4,4 раза. Максимальная относительная концентрация  $g_{\text{max}}$  сажи составляет  $0,123 \text{ г/кг}$ , а к моменту открытия выпускного клапана  $g = 0,03 \text{ г/кг}$ , т.е. снижается в 4,1 раза. Максимальное количество частиц  $N_{\text{max}}$  сажи составляет  $4,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а в момент открытия выпускного клапана  $N = 1,1 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 4,4 раза.

При работе по газодизельному процессу значение  $C_{\text{max}} = 0,21 \text{ г/м}^3$ , а в момент открытия выпускного клапана

$C_{\text{max}} = 0,02 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 10,5 раза; значение  $g_{\text{max}} = 0,085 \text{ г/кг}$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже всего  $0,01 \text{ г/кг}$ , т.е. снижается в 8,5 раза. Максимальное количество частиц  $N_{\text{max}}$  сажи составляет  $3,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже всего  $0,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 11 раз.

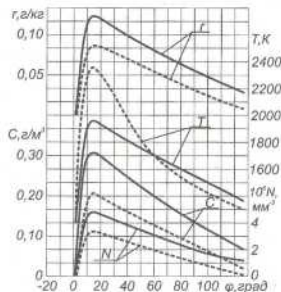


Рисунок 6.2 – Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.,  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,92 \text{ МПа}$  для дизельного процесса и  $p_e = 0,85 \text{ МПа}$  – для газодизельного: — дизель, - - - газодизель.

Снижение результирующего сажесодержания в ОГ дизеля и газодизеля с турбонаддувом на режиме максимального крутящего момента можно объяснить увеличением времени, отводимым на выгорание сажевых частиц при снижении частоты вращения коленчатого вала, так как временной фактор является определяющим для результирующего сажевыделения в дизелях.

На рис. 6.3,а и 6.3,б представлено влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания  $C$ ,  $g$  и  $N$  и температуру  $T$  в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{app} = 8^\circ$  п.к.в. на номинальном режиме и режиме максимального крутящего момента, соответственно.

При уменьшении значения установившегося УОВТ с 11 до  $8^\circ$  п.к.в. на номинальном режиме наблюдается снижение максимальной температуры  $T_{max}$  цисла как по дизельному, так и по газодизельному процессам по сравнению с оптимальным значением установившегося УОВТ на 4,8 и 2,1 %, соответственно. При этом при работе по дизельному процессу значение  $C_{max}$  составляет  $0,37 \text{ г/м}^3$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже  $0,15 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 2,5 раза. Значение  $g_{max}$  при этом составляет  $0,153 \text{ г/кг}$ , а  $g_{min}$  равно  $0,06 \text{ г/кг}$ , т.е. снизилось в 2,5 раза. Значение  $N_{max} = 6,0 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а  $N_{min} = 2,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 2,6 раза.

При работе по газодизельному процессу значение  $C_{max}$  составляет  $0,25 \text{ г/м}^3$ , а значение  $C_{min} = 0,05 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 5 раз. Соответственно,  $g_{max} = 0,100 \text{ г/кг}$ , а  $g_{min}$  равно  $0,016 \text{ г/кг}$ , т.е. снижение составляет 6,3 раза. При этом  $N_{max} = 3,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а  $N_{min} = 0,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 4,8 раза.

На режиме максимального крутящего момента (см. рис. 6.3,б) снижение значения  $T_{max}$  по сравнению с оптимальным установившимся УОВТ составляет 3,1 и 6,4 %, соответственно, для дизельного и газодизельного процессов.

При работе по дизельному процессу значение  $C_{max}$  составляет  $0,33 \text{ г/м}^3$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже  $0,07 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 4,7 раза. Значение  $g_{max}$  при этом составляет  $0,13 \text{ г/кг}$ , а значение  $g_{min}$  равно  $0,03 \text{ г/кг}$ , т.е. снизилось в 4,3 раза. При этом значение  $N_{max} = 5,2 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а значение  $N_{min} = 1,1 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 4,7 раза.

При работе по газодизельному процессу значение  $C_{max}$  составляет  $0,21 \text{ г/м}^3$ , а значение  $C_{min} = 0,02 \text{ г/м}^3$ , т.е. снижается в 10,5 раза. Соответственно, значение  $g_{max} = 0,08 \text{ г/кг}$ , а значение  $g_{min} = 0,008 \text{ г/кг}$ , т.е. снижение составляет 10 раз. При этом значение  $N_{max} = 3,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а значение  $N_{min} = 0,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 11 раз.

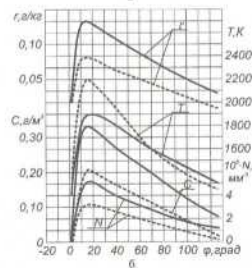
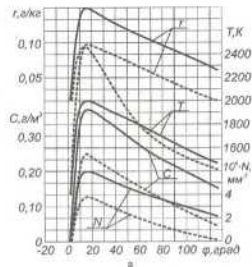


Рисунок 6.3 - Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{app} = 8^\circ$  п.к.в.:

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 — — — — — дизель; ······· газодизель.

Результатирующее массовое содержание сажи в ОГ возрастает на 14,3 % на дизельном процессе по сравнению с оптимальным установочным УОВТ. При работе по газодизельному процессу изменение содержания сажи при изменении УОВТ практически не увеличивается. Подобную зависимость можно объяснить тем, что во-первых, метан  $CH_4$  является наименее склонным к сажеобразованию углеводородом, а во-вторых, при работе на КПГ максимальная температура цикла значительно выше, чем у дизеля, соответственно возрастает скорость выгорания сажевых частиц. Этому также способствует высокий коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Таким образом, при уменьшении значения установочного УОВТ с  $11$  до  $8^\circ$  п.к.в. происходит увеличение сажеосодержания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 из-за снижения средней температуры цикла и, следовательно, скорости выгорания сажевых частиц.

При работе на природном газе увеличение значений сажеосодержания в момент открытия выпускного клапана незначительно по сравнению с оптимальным  $\Theta_{впр}$  из-за малой склонности природного газа к сажеобразованию.

На рис. 6.4,а и 6.4,б представлены показатели сажеосодержания  $S$ ,  $g$  и  $N$  и температуры  $T$  цикла в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{впр} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400$   $мин^{-1}$  и  $n = 1900$   $мин^{-1}$ , соответственно, при работе по дизельному и газодизельному процессам.

При более раннем по сравнению с оптимальным установочным УОВТ (рядом с увеличением «жесткости» процесса сгорания) возрастает и максимальная температура  $T_{max}$  цикла. На номинальном режиме такое увеличение температуры составляет 4,8 и 4,2 %, соответственно, при дизельном и газодизельном процессах. При этом максимум температуры и сажеосодержания смещается в сторону в.м.т. Одновременно с этим снижается результирующее сажеосодержание в цилиндре двигателя и дымность ОГ.

При работе по дизельному процессу значение  $S_{max}$  составляет  $0,30$   $г/м^3$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже  $0,08$   $г/м^3$ , т.е. снижается в 3,8 раза. Значение  $g_{max}$  при этом составляет  $0,12$   $г/кг$ , а значение  $g_{min}$  равно  $0,03$   $г/кг$ , т.е. снижилось в

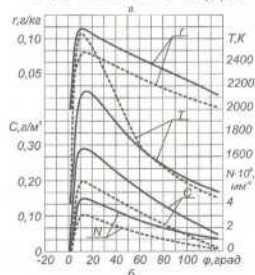
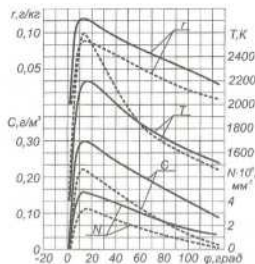


Рисунок 6.4 - Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. при  $\Theta_{впр} = 14^\circ$  п.к.в.:

а -  $n = 2400$   $мин^{-1}$ ; б -  $n = 1900$   $мин^{-1}$ ;  
 — — — — — дизель; - - - - - газодизель



4,0 раза. Соответственно, значение  $N_{\text{max}} = 4,7 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а  $N_{\text{min}} = 1,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 3,6 раза.

При работе по газодизельному процессу  $C_{\text{max}}$  составляет 0,22 г/м<sup>3</sup>, а  $C_{\text{min}} = 0,02$  г/м<sup>3</sup>, т.е. снижается в 11 раз. Соответственно,  $r_{\text{max}} = 0,09$  г/кг, а  $r_{\text{min}}$  равно 0,008 г/кг, т.е. снижение составляет 11,3 раза. При этом  $N_{\text{max}} = 3,5 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а  $N_{\text{min}} = 0,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 11,7 раза.

На режиме максимального крутящего момента при  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> (см. рис. 6.4,б) максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла по сравнению с этим же режимом при оптимальном УОВТ  $\Theta_{\text{opt}} = 11^\circ$  п.к.в. возрастает с 2350 до 2650 К, то есть на 12,8 %, при газодизельном процессе и с 1960 до 2150 К, то есть на 9,7 %, при дизельном процессе. Результирующее сажеобразование в цилиндре дизеля при этом снижается.

При работе по дизельному процессу  $C_{\text{max}}$  составляет 0,28 г/м<sup>3</sup>, а к моменту открытия выпускного клапана она составляет 0,05 г/м<sup>3</sup>, т.е. снижается в 5,6 раза. Максимальная относительная концентрация  $r_{\text{max}}$  сажи составляет 0,11 г/кг, а к моменту открытия выпускного клапана  $r = 0,02$  г/кг, т.е. снижается в 5,5 раза. Максимальное количество частиц  $N_{\text{max}}$  сажи составляет  $4,4 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а в момент открытия выпускного клапана  $N_{\text{max}} = 1,0 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 4,4 раза.

При работе по газодизельному процессу  $C_{\text{max}} = 0,20$  г/м<sup>3</sup>, а в момент открытия выпускного клапана  $C_{\text{min}} = 0,01$  г/м<sup>3</sup>, т.е. снижается в 20 раз,  $r_{\text{max}} = 0,080$  г/кг, а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже всего 0,004 г/кг, т.е. снижается в 20 раз. Максимальное количество частиц  $N_{\text{max}}$  сажи составляет  $3,1 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , а в момент открытия выпускных клапанов составляет уже всего  $0,16 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. снижается в 19,4 раза.

Таким образом, увеличение значения установочного УОВТ по сравнению с оптимальным позволяет снизить значения показателей сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на ДТ. Это объясняется повышением максимальной температуры цикла и, соответственно, ростом скорости выгорания сажевых частиц. При снижении значения установочного УОВТ до сравнительно с оптимальным возрастание показателей сажеобразования объясняется смещением процесса сгорания вправо от в.м.т., снижением

максимальной температуры и давления в цилиндре и, как следствие, повышенной неполнотой сгорания топлива.

При этом, однако, следует помнить, что более раннее впрыскивание топлива ведет к повышению «жесткости» процесса сгорания и росту нагрузок на детали КШМ.

## 6.2. Влияние применения природного газа на показатели сажеобразования и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

На рис. 6.5,а представлены максимальные значения показателей содержания сажи  $C_{\text{max}}$ ,  $r_{\text{max}}$  и  $N_{\text{max}}$  и максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла в цилиндре в зависимости от значения установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> и  $p_e = 0,84$  МПа.

Анализ представленных графиков показывает, что при работе по дизельному процессу с увеличением значения установочного УОВТ с 5 до  $17^\circ$  п.к.в. возрастает максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла и снижается максимальная концентрация сажи в цилиндре. Значение  $T_{\text{max}}$  возрастает от 1730 до 2250 К, т.е. на 30,1 %. В то же время значение  $C_{\text{max}}$  при этом снижается от 0,43 до 0,27 г/м<sup>3</sup>, т.е. на 37,2 %, значение  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,170 до 0,115 г/кг, т.е. на 32,4 %, значение  $N_{\text{max}}$  снижается, соответственно, от  $6,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $4,2 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. на 38,2 %.

При работе по газодизельному процессу при изменении значения установочного УОВТ от 5 до  $14^\circ$  п.к.в. значение  $T_{\text{max}}$  возрастает от 2270 до 2600 К, т.е. на 14,5 %, значение  $C_{\text{max}}$  при этом снижается с 0,27 до 0,22 г/м<sup>3</sup>, т.е. на 18,5 %, значение  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,11 до 0,09 г/кг, т.е. на 18,2 %, значение  $N_{\text{max}}$  снижается с  $4,2 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $3,5 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. на 16,7 %.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при значении установочного УОВТ  $11^\circ$  п.к.в.,  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> и  $p_e = 0,84$  МПа значение  $T_{\text{max}}$  возрастает с 2100 до 2500 К, т.е. на 19 %, значение  $C_{\text{max}}$  снижается с 0,33 до 0,23 г/м<sup>3</sup> (на 30,3 %), значение  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,133 до 0,093 г/кг (на 30,1 %), значение  $N_{\text{max}}$  снижается с  $5,2 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $3,6 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  (на 30,1 %).

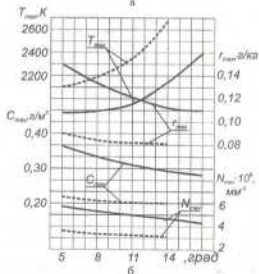
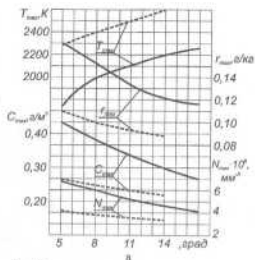


Рисунок 6.5 – Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ:

а –  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;

— дизель; - - - - газодизель

На рис. 6.5, б представлены максимальные значения показателя содержания  $C_{\text{max}}$ ,  $r_{\text{max}}$  и  $N_{\text{max}}$  сажи и максимальная температура  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре в зависимости от изменения установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

При увеличении установочного УОВТ резко возрастает максимальная температура цикла и снижается содержание сажи в ОГ из-за интенсификации процесса окисления сажевых частиц. Соответственно снижается и количество частиц сажи в единице объема.

При работе по дизельному процессу с увеличением значения установочного УОВТ с 5 до 17° п.к.в. возрастает максимальная температура  $T_{\text{max}}$  цикла и снижается максимальная концентрация сажи в цилиндре.  $T_{\text{max}}$  возрастает от 1880 до 2360 К, т.е. на 25,5%.  $C_{\text{max}}$  при этом снижается от 0,37 до 0,28  $\text{г/м}^3$ , т.е. на 24,3%,  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,15 до 0,11  $\text{г/кг}$ , т.е. на 26,7%,  $N_{\text{max}}$  снижается, соответственно, от  $5,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $4,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. на 25,9%.

При работе по газодизельному процессу при изменении значения установочного УОВТ от 5 до 14° п.к.в. значение  $T_{\text{max}}$  возрастает от 2090 до 2690 К, т.е. на 28,7%, значение  $C_{\text{max}}$  снижается с 0,22 до 0,09  $\text{г/м}^3$ , т.е. на 9,1%, значение  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,09 до 0,08  $\text{г/кг}$ , т.е. на 11,1%, значение  $N_{\text{max}}$  снижается с  $3,5 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $3,1 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$ , т.е. на 11,4%.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при значении установочного УОВТ 11° п.к.в.,  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  значение  $T_{\text{max}}$  возрастает с 1960 до 2350 К, т.е. на 19,9%, значение  $C_{\text{max}}$  снижается с 0,31 до 0,21  $\text{г/м}^3$  (на 32,3%), значение  $r_{\text{max}}$  снижается от 0,123 до 0,085  $\text{г/кг}$  (на 30,9%), значение  $N_{\text{max}}$  снижается с  $4,8 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  до  $3,3 \cdot 10^6$  в  $\text{мм}^3$  (на 31,3%).

Таким образом, установочный УОВТ оказывает значительное влияние на показатели сажеосодержания в цилиндре двигателя как при работе по дизельному, так и по газодизельному процессу. Поэтому с точки зрения снижения дымности ОГ необходимо увеличивать установочный УОВТ, но при этом необходимо учитывать значения показателя процесса сгорания и, прежде всего, «жесткости» процесса сгорания.

### 6.3. Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

На рис. 6.6, а представлены максимальные значения показателей содержания  $C_{\text{макс}}$  и  $N_{\text{макс}}$  сажи и максимальная температура  $T_{\text{макс}}$  газов в цилиндре двигателя в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{пер}} = 11^\circ$  п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>.

При увеличении нагрузки происходит увеличение содержания сажи в цилиндре и температуры цикла. Это связано с увеличением цикловой подачи топлива, но в то же время с ростом температуры увеличивается и скорость окисления сажевых частиц и, соответственно, доля выгорающей сажи. Высокие турбулентности заряда и коэффициент избытка воздуха позволяют снизить содержание сажи в ОГ дизеля до норм Евро-2, а газодизеля – до норм Евро-4 и выше.

При работе по дизельному процессу изменение нагрузки от 0,12 до 0,88 МПа приводит к возрастанию  $T_{\text{макс}}$  от 1550 до 2120 К (на 36,8 %),  $C_{\text{макс}}$  возрастает от 0,16 до 0,34 г/м<sup>3</sup> (в 2,1 раза),  $r_{\text{макс}}$  возрастает от 0,06 до 0,137 г/кг (в 2,28 раза),  $N_{\text{макс}}$  возрастает от 2,5·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> до 5,3·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> (в 2,1 раза).

При работе по газодизельному процессу изменение нагрузки от 0,12 до 0,85 МПа приводит к возрастанию значения  $T_{\text{макс}}$  от 1600 до 2500 К, т.е. на 56,3 %, значение  $C_{\text{макс}}$  возрастает от 0,11 до 0,23 г/м<sup>3</sup> (в 2,1 раза), значение  $r_{\text{макс}}$  возрастает от 0,040 до 0,093 г/кг (в 2,3 раза), значение  $N_{\text{макс}}$  возрастает от 1,7·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> до 3,6·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> (в 2,1 раза).

При переходе с дизельного на газодизельный процесс на номинальном режиме работы значение  $T_{\text{макс}}$  возрастает от 2100 до 2500 К, т.е. на 19 %, значение  $C_{\text{макс}}$  снижается с 0,33 до 0,23 г/м<sup>3</sup> (на 30,3 %), значение  $r_{\text{макс}}$  снижается от 0,133 до 0,093 г/кг (на 30,1 %), значение  $N_{\text{макс}}$  снижается с 5,2·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> до 3,6·10<sup>6</sup> в мм<sup>3</sup> (на 30,1 %).

На рис. 6.6,б представлены максимальные значения показателей содержания  $C_{\text{макс}}$ ,  $r_{\text{макс}}$  и  $N_{\text{макс}}$  сажи и максимальная температура

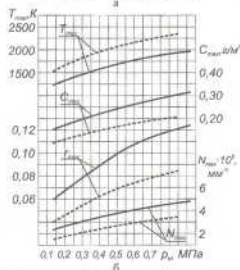
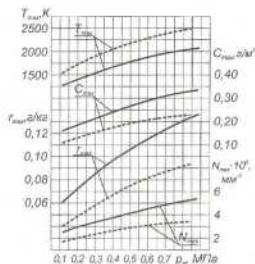


Рисунок 6.6 – Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{пер}} = 11^\circ$  п.к.в.: а –  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>; б –  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>; — — — — — дизель; - - - - - газодизель

тура  $T_{max}$  газов в цилиндре двигателя в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{впр} = 11^\circ$  п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

На режиме максимального крутящего момента зависимости содержания сажи и максимальной температуры  $T_{max}$  в цилиндре от изменения нагрузки сохраняются. С увеличением нагрузки возрастает максимальная температура  $T_{max}$  цикла, при этом максимальная температура газодизельного процесса находится выше значений температуры  $T_{max}$  дизельного процесса. Максимальное сажеобразование в цилиндре двигателя с ростом нагрузки возрастает, но становится меньше, чем на номинальном режиме.

При работе по дизельному процессу изменение нагрузки от 0,13 до 0,92 МПа приводит к возрастанию  $T_{max}$  от 1400 до 1970 К (на 40,7%),  $C_{max}$  возрастает от 0,16 до 0,32 г/м<sup>3</sup> (в 2,0 раза),  $r_{max}$  возрастает от 0,06 до 0,125 г/кг (в 2,1 раза),  $N_{max}$  возрастает от  $2,5 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $5,0 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (в 2,0 раза).

При работе по газодизельному процессу изменение нагрузки от 0,13 до 0,85 МПа приводит к возрастанию значения  $T_{max}$  от 1600 до 2360 К, т.е. на 46,9%, значение  $C_{max}$  возрастает от 0,10 до 0,21 г/м<sup>3</sup> (в 2,1 раза), значение  $r_{max}$  возрастает от 0,040 до 0,085 г/кг (в 2,1 раза), значение  $N_{max}$  возрастает от  $1,6 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $3,3 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (в 2,1 раза).

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  значение  $T_{max}$  возрастает от 1960 до 2350 К, т.е. на 19,9%, значение  $C_{max}$  снижается с 0,31 до 0,21 г/м<sup>3</sup> (на 32,3%), значение  $r_{max}$  снижается от 0,123 до 0,085 г/кг (на 30,9%), значение  $N_{max}$  снижается с  $4,8 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $3,3 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (на 31,3%).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что применение природного газа позволяет снизить показатели сажеобразования в цилиндре во всем диапазоне изменения нагрузки.

#### 6.4. Влияние применения природного газа на показатели сажеобразования и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения

На рис. 6.7 представлено изменение значений показателей сажеобразования  $C_{max}$ ,  $r_{max}$  и  $N_{max}$  и температуры  $T_{max}$  в цилиндре дизеля с турбонаддувом в зависимости от частоты вращения при  $\Theta_{впр} = 11^\circ$  п.к.в. и работе по дизельному и газодизельному процессам.

При увеличении частоты вращения происходит возрастание значения максимальной температуры  $T_{max}$  цикла и максимального сажеобразования  $C_{max}$ ,  $r_{max}$  и  $N_{max}$  в цилиндре дизеля с турбонаддувом.

При низкой частоте вращения максимальное массовое сажеобразование ниже, поскольку увеличивается период времени, отводимый на окисление сажевых частиц, хотя при температурах менее 2000 К интенсивность сажеобразования максимальна.

При повышении частоты вращения и возрастании температуры цикла максимальное массовое содержание сажи возрастает. Необходимо отметить, что максимальные показатели сажеобразования при работе по газодизельному процессу находятся ниже аналогичных значений дизельного процесса на всех рассматриваемых скоростных режимах.

Анализ графиков показывает, что при работе по дизельному процессу при  $\Theta_{впр} = 11^\circ$  п.к.в. изменение частоты вращения от 1200 до 2500  $\text{мин}^{-1}$  приводит к возрастанию  $T_{max}$  от 1820 до 2150 К, т.е. на 18,1%,  $C_{max}$  возрастает с 0,16 до 0,34 г/м<sup>3</sup>, т.е. в 2,1 раза,  $r_{max}$  при этом возрастает от 0,065 до 0,135 г/кг, т.е. в 2,1 раза, а  $N_{max}$  возрастает от  $2,5 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $5,3 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (в 2,1 раза).

При работе по газодизельному процессу изменение частоты вращения от 1200 до 2500  $\text{мин}^{-1}$  приводит к возрастанию значения  $T_{max}$  2150 до 2520 К, т.е. на 17,2%, значение  $C_{max}$  возрастает с 0,08 до 0,24 г/м<sup>3</sup>, т.е. в 3 раза, значение  $r_{max}$  при этом возрастает от 0,03 до 0,10 г/кг, т.е. в 3,3 раза, а значение  $N_{max}$  возрастает от  $1,3 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $3,8 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (в 2,9 раза).

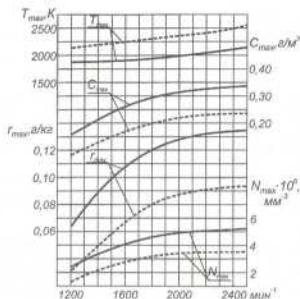


Рисунок 6.7 – Влияние применения природного газа на показатели сажеосодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при  $\Theta_{opt} = 11^\circ$  п.в.в.:  
 — дизель; - - - - газодизель

Сравнивая дизель с газодизелем, необходимо отметить, что при переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  максимальная температура  $T_{max}$  цикла возрастает с 2100 до 2500 К (на 19%), значение  $C_{max}$  снижается с 0,33 до 0,23 г/м<sup>3</sup> (на 30,3%), значение  $r_{max}$  снижается от 0,133 до 0,093 г/кг (на 30,1%), значение  $N_{max}$  снижается с  $5,2 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $3,6 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (на 30,1%).

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_c = 0,84 \text{ МПа}$  максимальная температура  $T_{max}$  цикла возрастает с 1960 до 2350 К, т.е. на 19,9%, значение  $C_{max}$  снижается с 0,31 до 0,21 г/м<sup>3</sup> (на 32,3%), значение  $r_{max}$  снижается от 0,123 до 0,085 г/кг (на 30,9%), значение  $N_{max}$  снижается с  $4,8 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> до  $3,3 \cdot 10^6$  в мм<sup>3</sup> (на 31,3%).

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных

при переводе дымности из единиц по шкале Bosch в массовое содержание сажи  $C$  (г/м<sup>3</sup>) мы воспользовались эмпирическим соотношением [449]:

$$C = 565 \left( \ln \frac{10}{10 - \text{bosch}} \right)^{1,28}, \quad (6.1)$$

где bosch – дымность ОГ по шкале Bosch.

При этом сходимость расчетных и экспериментальных результатов показала на удовлетворительную корректность проведенных расчетов.

Подводя итоги экспериментальных и расчетных исследований по изучению влияния применения КПГ в качестве моторного топлива в дизеле с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5, можно сказать, что совместное использование природного газа и турбонаддува позволяет значительно снизить дымность и сажеосодержание в ОГ и тем самым улучшить экологические показатели дизеля Д-245.12С размерности 4ЧН 11,0/12,5.

Необходимо отметить, что при работе по газодизельному процессу в цилиндре дизеля тем не менее образуется значительное количество сажевых частиц, хотя и меньше чем при работе по дизельному процессу. Однако скорость выгорания сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом значительно выше, соответственно и ее концентрация в цилиндре к моменту открытия выпускного клапана становится существенно ниже, чем при работе на дизельном топливе.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований доказана эффективность использования КПГ в дизеле размерности 4ЧН 11,0/12,5 с целью снижения дымности ОГ.

## 7. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5

### 7.1. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

На рис. 7.1,а представлены показатели процесса сгорания, объемное содержание  $\tau_{NOx}$  и массовая концентрация  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ при номинальной частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузке.

Из графиков видно, что с увеличением значения установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают значения  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  оксидов азота, а также максимальное давление  $P_{2max}$  и температура  $T_{max}$  газов в цилиндре двигателя.

При всех значениях установочного УОВТ при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания  $\tau_{NOx}$  и массовой концентрации  $C_{NOx}$  оксидов азота, увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя.

Так, при работе по газодизельному процессу при  $\Theta_{app} = 5^\circ$  п.к.в. значения  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  составляют 253 ppm и  $0,0340 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 3 % ниже значений дизельного процесса. При работе по газодизельному процессу при  $\Theta_{app} = 14^\circ$  п.к.в. значения  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  составляют 265 ppm и  $0,0350 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

На рис. 7.1,б представлено объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота и показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ при частоте вращения  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и соответствующей нагрузке.

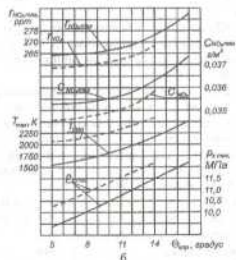
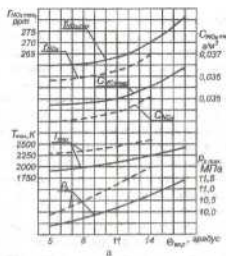


Рисунок 7.1 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

— — — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

Из графиков видно, что с увеличением значения установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам также возрастают значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальные значения давления и температура газов в цилиндре двигателя.

При всех значениях УОВТ при переходе на газодизельный процесс также происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ$  п.к.в. значения  $\Gamma_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  составляют 258 ppm и  $0,0346 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 3 % ниже значений дизельного процесса. При работе по газодизельному процессу при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. значения  $\Gamma_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  составляют 262 ppm и  $0,0350 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса. Это связано с неравномерным распределением температуры в зоне горения, что значительно влияет на выход NO.

Таким образом, по показателям объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и показателям процесса сгорания необходимо для газодизеля принять оптимальный установочный УОВТ –  $11^\circ$  п.к.в.

Увеличение значений показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения при работе по газодизельному процессу на всех исследуемых значениях установочного УОВТ объясняется в первую очередь тем, что при работе на КПГ увеличивается угол, соответствующий ПЗВ, то есть процесс сгорания происходит в меньший период времени и более интенсивно, что в свою очередь прешествует окислению азота.

Графики изменения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в., частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и номинальной нагрузке и представлены на рис. 7.2.а.

Из графиков видно, что максимальные значения  $\Gamma_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой  $T_{\text{max}}$  цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в

ОГ и увеличиваются с увеличением значения  $T_{\text{max}}$  цикла. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу  $\Gamma_{\text{NOx max}}$  в цилиндре составляет 270 ppm, что выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 4 % и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Следовательно, это говорит о том, что с уменьшением температуры происходит активное разложение образовавшегося оксида азота. Значение  $\Gamma_{\text{NOx max}}$  при работе по дизельному процессу составляет 261 ppm; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $\Gamma_{\text{NOx}}$  составляет 255 ppm, что на 3 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение массового содержания  $C_{\text{NOx}}$  оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет  $0,0348 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $C_{\text{NOx}}$  составляет  $0,0342 \text{ г/м}^3$ , что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики изменения объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в. представлены на рис. 7.2.б.

Из графиков видно, что максимальные значения  $\Gamma_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой  $T_{\text{max}}$  цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу значение  $\Gamma_{\text{NOx max}}$  в цилиндре составляет 273 ppm, что на 3 % выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу и на 34 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение  $C_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет 265 ppm; при этом же значении угла п.к.в. значение  $\Gamma_{\text{NOx}}$  при работе по газодизельному процессу составляет 260 ppm, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение  $C_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет  $0,0353 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в.

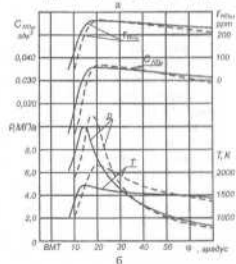
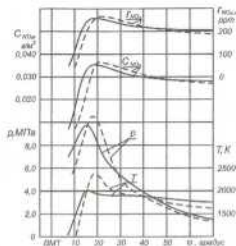


Рисунок 7.2 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. двигателя при  $\Theta_{\text{всп}} = 8^\circ$  п.к.в.:

а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ .

— — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

значение  $C_{\text{NOx}}$  при работе по газодизельному процессу составляет  $0,0347 \text{ г/м}^3$ , что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.3,а.

Из графиков видно, что максимальные значения  $\tau_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота и ОГ и увеличиваются с увеличением значения максимальной температуры цикла. Так, при  $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу значение  $\tau_{\text{NOx, max}} = 272 \text{ ppm}$ , что на 4 % выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение  $\tau_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет 263 ppm; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $\tau_{\text{NOx}}$  составляет 257 ppm, что на 3 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение  $C_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет  $0,0350 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $C_{\text{NOx}}$  составляет  $0,0344 \text{ г/м}^3$ , что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.3,б.

Из графиков видно, что максимальные значения  $\tau_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой  $T_{\text{max}}$  цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры  $T_{\text{max}}$  цикла.



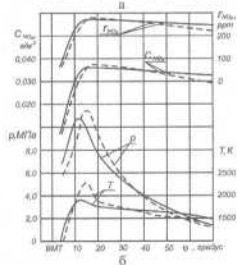
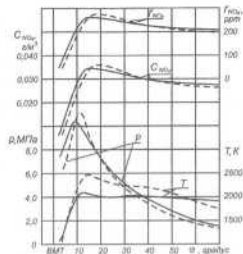


Рисунок 7.3 - Влияние изменения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу максимальное значение  $r_{NOx}$  в цилиндре составляет 277 ppm, что на 4 % выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение  $r_{NOx}$  при работе по дизельному процессу составляет 267 ppm; при этом же значении угла п.к.в. значение  $r_{NOx}$  при работе по газодизельному процессу составляет 262 ppm, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение  $C_{NOx}$  при работе по дизельному процессу составляет  $0,0357 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $C_{NOx}$  составляет  $0,0350 \text{ г/м}^3$ , что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.4,а.

Из графиков видно, что максимальные значения  $r_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой  $T_{\text{max}}$  цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением значения максимальной температуры  $T_{\text{max}}$  цикла. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу значение  $r_{NOx \text{ max}} = 280 \text{ ppm}$ , что на 4 % выше содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу и на 38 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме.

Максимальное значение  $r_{NOx}$  при работе по дизельному процессу составляет 270 ppm; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $r_{NOx}$  составляет 265 ppm, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение  $C_{NOx}$  при работе по дизельному процессу составляет  $0,0355 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в. значение  $C_{NOx} = 0,0350 \text{ г/м}^3$  при работе по газодизельному процессу, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

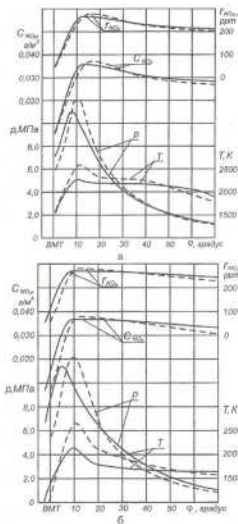


Рисунок 7.4 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.4,б.

Из графиков видно, что максимальные значения  $\tau_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением значения максимальной температуры  $T_{\text{макс}}$  цикла. Так, при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  при работе по газодизельному процессу значение  $\tau_{\text{NOx max}}$  составляет 282 ppm, что на 4 % выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу и на 30 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение  $\tau_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет 273 ppm; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу значение  $\tau_{\text{NOx}}$  составляет 268 ppm, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Максимальное значение  $C_{\text{NOx}}$  при работе по дизельному процессу составляет  $0,0363 \text{ г/м}^3$ ; при этом же значении угла п.к.в. при работе по газодизельному процессу  $C_{\text{NOx}} = 0,0363 \text{ г/м}^3$ , что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

## 7.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах

Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период, при работе по газодизельному процессу, приводит к снижению доли потерь теплоты в этот период. Это вызывает увеличение значения коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование теплоты в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

Графики объемного содержания и массовой концентрации

оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{нр}} = 8^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.5,а.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация  $\text{NO}_x$ , максимальные значения давления  $p_{z\text{max}}$  и температуры  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре двигателя. Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации  $\text{NO}_x$ , увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_z = 0,84 \text{ МПа}$  значения  $\tau_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$  составляют 255 ppm и  $0,0341 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 3 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{нр}} = 8^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.5,б.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают значения  $\tau_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , максимальные значения давления и температуры газов в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение значений  $\tau_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_z = 0,85 \text{ МПа}$  значения  $\tau_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$  составляют 260 ppm и  $0,0347 \text{ г/м}^3$  соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры  $T_{\text{max}}$  и давления  $p_{z\text{max}}$  газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{нр}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  представлены на рис. 7.6,а.

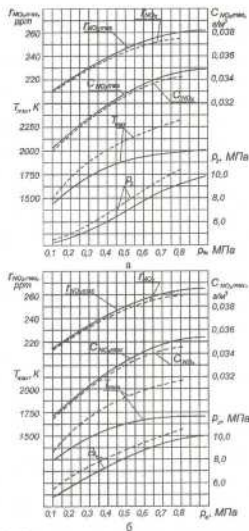


Рисунок 7.5 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{нр}} = 8^\circ$  п.к.в.: а -  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ ;

— — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают значения  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , максимальные значения давления и температуры газов в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение значений  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_b = 0,84$  МПа значения  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$  составляют 257 ppm и  $0,0345$  г/м<sup>3</sup> соответственно, что на 3 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 7.6,б.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам также возрастают значения  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , максимальные значения давления  $p_{z,\text{max}}$  и температуры  $T_{\text{max}}$  газов в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение значений  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_b = 0,85$  МПа значения  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$  составляют 263 ppm и  $0,0350$  г/м<sup>3</sup> соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 7.7,а.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают значения  $\gamma_{\text{NO}_x}$  и  $C_{\text{NO}_x}$ , максимальные значения давления и температуры в цилиндре двигателя.

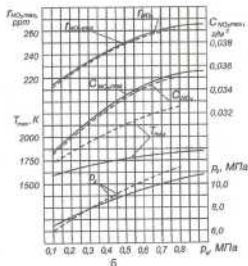
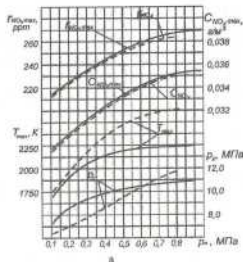


Рисунок 7.6 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.: а -  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>,  
 — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_c = 0,84$  МПа значения  $\gamma_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  составляют 265 ppm и  $0,0350$  г/м<sup>3</sup> соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{app} = 14^\circ$  п.к.в. и  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 7.7,б.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают значения  $\gamma_{NOx}$  и  $C_{NOx}$ , максимальное давление и температура газов в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение значений  $\gamma_{NOx}$  и  $C_{NOx}$ , увеличение максимальных значений давления и температуры газов в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при  $p_c = 0,85$  МПа значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 268 ppm и  $0,0358$  г/м<sup>3</sup> соответственно, что на 2 % ниже значений дизельного процесса.

Из графиков видно, что применение КПГ в качестве топлива приводит к уменьшению максимальной концентрации оксидов азота в цилиндре дизеля. Так, при  $\Theta_{app} = 11^\circ$  п.к.в. и  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота составляет 262 ppm, а по дизельному процессу 266 ppm, т.е. на 1,5 % ниже.

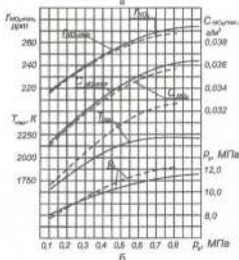
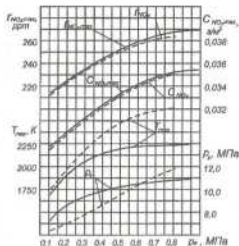


Рисунок 7.7 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{app} = 14^\circ$  п.к.в.: а -  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>; б -  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>; — — — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

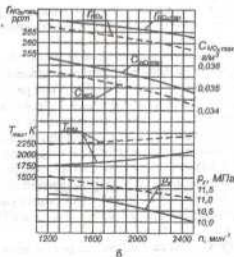
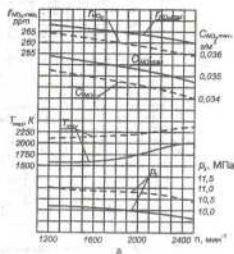
### 7.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения

Графики изменения значений  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$ , максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при значении установочного УОВТ  $\Theta_{уп} = 8^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 7.8,а.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения происходит снижение значений  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  и максимального давления газов в цилиндре, но увеличение максимальной температуры цикла. Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения от  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  происходит уменьшение объемного содержания с 265 ppm до 255 ppm и массовой концентрации оксидов азота с  $0,0353 \text{ г/м}^3$  до  $0,0342 \text{ г/м}^3$ . При переходе на газодизельный режим значения  $\tau_{NOx}$  и  $C_{NOx}$  ниже в среднем на 3% во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{уп} = 11^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 7.8,б.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения происходит также снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и максимального давления газов в цилиндре, увеличение значения максимальной температуры цикла. Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя от  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  происходит уменьшение объемного содержания с 267 ppm до 257 ppm и массовой концентрации оксидов азота с  $0,0357 \text{ г/м}^3$  до  $0,0344 \text{ г/м}^3$ . При переходе на газодизельный процесс объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота ниже в среднем на 3% во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.



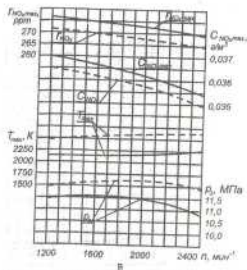


Рисунок 7.8 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения:

а -  $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$  п.к.в.; б -  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  п.к.в.; в -  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в.;  
 ——— дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при  $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$  п.к.в. в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 7.8, а.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения происходит снижение значений  $r_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  в цилиндре, увеличению значения максимальной температуры цикла. Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения от  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  до  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  происходит уменьшение  $r_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  с 272 ppm до 265 ppm и с  $0,0365 \text{ г/м}^3$  до  $0,0351 \text{ г/м}^3$ , соответственно.

При переходе на газодизельный режим значения  $r_{\text{NOx}}$  и  $C_{\text{NOx}}$  ниже в среднем на 3 % во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Физматгиз, 1960. - 715 с.
2. Автомобили с бензоголовыми двигателями и газодизелями: особенности конструкции и технического обслуживания / К.Е. Долганов, А.Г. Голоруц, А.И. Петяниченко, А.М. Мансуров, А.П. Левковский. - К.: Техника, 1991. - 123 с.
3. Автомобиль ЗИЛ-138А и его модификации - М.: Машиностроение, 1989. - 350 с.
4. Аздобич Б.А. Каталитические нейтрализаторы отработавших газов и экологическая безопасность АТС // Автомобильная промышленность. - 2005. - № 1. - С. 9-11.
5. Алемасов В.Е., Дрегалкин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1980. - 531 с.
6. Анализ скоростного режима работы газодизеля 4Ч11,0/12,5 при работе с рециркуляцией отработавших газов / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, М.А. Олейник, А.В. Россохин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Витебская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 75-81.
7. Архипов В.А., Измайлов С.Н., Ротанов Г.С. Измерение концентрации и дисперсности сжигаемых частиц в светящемся пламени // Тр. НИИ приклад. математики и механики Томского гос. ун-та. - Томск - 1977. - № 6.-С. 10-12.
8. А.с.1409768 СССР, МКН F02M 21/02. Газовоздушный смеситель-дозатор для двигателя внутреннего сгорания / С.Е. Богачев, В.А. Лиханов, В.М. Попов, А.М. Сайкин (СССР). - 3 с.: ил. 3.
9. А.с. 953234 СССР, МКН F01N3/02. Жидкостный очиститель газов / В.Е. Васильковский (СССР). - 3 с.
10. Базовый эксперимент по природе дизельной струи / Ю.Б. Свиридов, А.И. Кобзев, В.Л. Кукушкин, С.А. Романов // Двигательостроение. - 1992. - № 1-3. - С. 3-7.
11. Бакиров Ф.Г. Образование сажи при горении гомогенных тексазовоздушных смесей при давлении до 1,5 МПа // Физика горения и взрыва. - 1983. - № 2. - С. 51-56.
12. Балабаева И.А. Италия - лидер в использовании газовых автомобилей // Автомобильный транспорт. - 2006. - № 1. - С. 56-58.
13. Балашин В.И., Еремеев А.Ф., Семенов Б.Н. Топливная аппаратура быстрородных дизелей. - Л.: Машиностроение, 1967. - 298 с.
14. Баранов Н.А. Разработка методов и проведение экспериментальных исследований на двигателе условий образования и физических свойств дизельной сажи: Дис. канд. техн. наук / ЦНИДИ. - Л., 1981. - 142 с.
15. Баранов В.Г., Пугачев Б.П. Основы расчета процессов смесеобразова-

- ния и тепловыделения по объему неразделенной камеры сгорания форсированных дизелей // Рабочие процессы компрессоров и двигателей внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. ЛПИ, - Л., 1980. - № 370. - С. 57-63.
16. Баранов Н.А., Смайлус В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи // Экспериментальные и теоретические исследования по созданию новых дизелей и агрегатов / Тр. ЦНИДИ. - Л., 1980. - С. 82-87.
17. Барра Ж.Р. Основные понятия математической статистики. - М.: Мир, 1974. - 275 с.
18. Батурин С.А., Байков А.Б. Обобщенный анализ процесса сажевыделения в дизелях с впрыскиваемым топливом в неразделенную камеру сгорания // Двигателестроение. - 1988. - № 2. - С. 8-9, 21.
19. Батурин С.А., Журавлев А.Н. К вопросу об определении степени черноты пламени в цилиндре дизеля // Проблема создания и использование двигателей с высоким наддувом. - Харьков, 1979. - С. 392-394.
20. Батурин С.А., Звоинов В.А., Фурса В.В. О величине локальных температур сгорания в цилиндрах дизеля // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков, 1979. - № 29. - С. 38-45.
21. Батурин С.А., Курочкин В.А. Критический анализ методов приближенного расчета радиационного теплообмена в дизелях // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ, - Л., 1985. - № 411. - С. 48-52.
22. Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование динамики сажевыделения в температуры пламени на неустойчивых режимах работы дизеля ЯМЗ-238НВ // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Сб. науч. тр. - Барнаул, 1978. - С. 40-53.
23. Батурин С.А., Ложкин В.Н., Степанов В.Н. Методика и некоторые результаты исследования излучательных характеристик пламени автотракторного дизеля при неустойчивых режимах работы // Рабочие процессы компрессоров и двигателей внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. ЛПИ, - Л., 1980. - № 370. - С. 48-53.
24. Батурин С.А., Лоскутов А.С., Алян Ж.К. Исследование процессов образования окислов азота в быстроходном дизеле автотракторного типа // Рабочие процессы и усовершенствование теплотехнических устройств и электрических систем: Сб. науч. тр. - Алма-Ата: КазПн, 1981. - Вып. 13. - С. 68-73.
25. Батурин С.А., Макаров В.В. Физико-химический механизм и методика расчета результирующего сажевыделения в дизелях // Физика горения и взрыва. - 1986. - № 2. - С. 65-71.
26. Батурин С.А., Макаров В.В., Лоскутов А.С. Феноменология и химизм процесса результирующего сажевыделения в дизелях // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ, - Л., 1985. - № 411. - С. 52-55.

27. Батурин С.А., Петриченко Р.М., Степанов В.Н. Конвективный и лучистый теплообмен в цилиндре дизеля при переходных процессах // Двигателестроение. - 1980. - № 6. - С. 18-20.
28. Батурин С.А., Свищев В.А. Математическое моделирование локального лучистого теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - № 6. - С. 15-18.
29. Батурин С.А., Свищев В.А. Физические условия и определяющие показатели радиационного теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - № 12. - С. 14-16.
30. Бакир Л.П., Жданович О.Б. Спектральная излучательная способность продуктов сгорания дизельного топлива в области спектра 2,0-5,5 мкм // Физика горения и взрыва. - 1976. - № 1. - С. 75-81.
31. Бенсон С. Термодинамическая кинетика: Пер. с англ. / Под ред. Н.С. Енколупова. - М.: Мир, 1971. - 308 с.
32. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 432 с.: ил.
33. Блох А.Г., Модзалевская М.Л., Быстров Н.Г. Радиационные характеристики полдисперсных систем частиц углерода в светящемся пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - № 5. - С. 37-41.
34. Блох А.Г., Щелочков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Ч. 1 // ИФЖ. - 1990. - Т. 59. - № 3. - С. 492-499.
35. Блох А.Г., Щелочков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Ч. 2 // ИФЖ. - 1992. - Т. 62. - № 6. - С. 831-839.
36. Блох А.Г., Щелочков А.И. Влияние механизма пиролиза метана на излучательные свойства факела природного газа // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. третьего Милоского Межд. форума по тепло-массообмену. - Минск, 1996. - Т. 2. - С. 40-41.
37. Бородина Н.М., Теснер П.А. Кинетика образований пироуглерода из ацетилена // Химия твердого топлива. - 1978. - № 6. - С. 140-143.
38. Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четверушкин Б.И. Химическая кинетика образования оксидов азота при горении. - М.: Наука, 1974. - 146 с.
39. Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четверушкин Б.И. Химическая кинетика образования оксидов азота при горении метана в воздухе. - М.: Вост. Центр. Модел. АН СССР. - № 25. - 1992. - 48 с.
40. Брозе Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1969. - 247 с.
41. Булаев В.Г. Снижение токсичности тепловых дизелей // Железнодорожный транспорт. - 1993. - № 10. - С. 45-48.
42. Быков В.И., Паросиданов И.В., Виноград С.Л. Дизель СМД-31.15 для автомобилей КРАЗ // Автошляхоукр Украины. - 1995. - № 4. - С. 27-29.
43. Варнат Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. - М.: Физматлит, 2003. - 351 с.



44. Васильев В.В. Криогенный КамАЗ // Автомобильный транспорт. - 2006. - № 1. - С. 50-54.
45. Веденин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. - М.: Колос, 1973. - 199 с.
46. Вейсблат М.Х. Разработка малотоксичных модификаций дизелей ДМ-21А // Двиглестроение. - 1994. - С. 43.
47. Веселов С.Н., Звонимынский Л.А., Марченко Ю.Е. Численное моделирование горения углерода в воздухе // ФТГ. - 1986. - № 3. - С. 38-44.
48. Ветрова Н.В., Померанцев В.В., Дудылева Л.Т. Приближенная теория образования окислов азота в топках парогенераторов // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: Сб. науч. тр. - Л.: ЛПИ, 1977. - Вып. 2. - С. 38-40.
49. Вильямс Ф.А. Теория горения. - М.: Наука, 1971. - 615 с.
50. Вихерт М.М., Мазинг М.В. Топливная аппаратура автомобильных двигателей. - М.: Машиностроение, 1978. - 176 с.
51. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходных двигателей на свойства сажи и отработавших газов / М.М. Вихерт, А.П. Кратко, И.С. Рафальский, Г.А. Смирнов, П.А. Теснер // Автомобильная промышленность. - 1975. - № 10. - С. 8-11.
52. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1977. - 277 с.
53. Вольская Н.А., Новиков Л.А., Хинчук Г. Моделирование рабочего процесса и эмиссии окислов азота (NO<sub>x</sub>) малотоксичного дизеля с рециркуляцией отработавших газов, обогащенных кислородом // Двиглестроение. - 1996. - № 1. - С. 13-18.
54. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба / Л.В. Вершков, В.Л. Гродев, В.В. Гаврилов и др. - М., 1999. - 68 с.
55. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экологического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варяжанин, М.А. Вилонский и др. - М.: Экономика, 1986. - 96 с.
56. Вудас Л.А., Ершин П.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. - Л.: Энергия, 1968. - 204 с.
57. Вырубов Д.Н. О методике расчета испарения топлива. - М.: Машиностроение, 1964. - 145 с.
58. Гаврилов Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. - 190 с.
59. Газобаллонный БелАЗ / К.Е. Долганов, Н.Е. Основенко, А.И. Петичко и др. // Промышленный транспорт. - 1988. - № 5. - С. 12-13.
60. Газодизельные автомобили КамАЗ моделей 53208, 53218, 53219, 54118, 55118, 53217: Дополнение к руководству по эксплуатации автомобилей КамАЗ-5320 / Под ред. Д.Х. Валева. - М.: Машиностроение, 1988. - 60 с.

61. Гейдон А.Г. Спектроскопия пламен / Пер. с англ. // Под ред. В.Н. Кондратьева. - М.: Издательство иностранной литературы, 1959. - 381 с.: ил.
62. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / Пер. с англ. Н.С. Черепного. // Под ред. С.А. Гольдберга. - М.: Металлургия, 1959. - 333 с.: ил.
63. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когирко С.М. Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристика // ИФЖ. - Т. 27. - 1974. - № 1.
64. Гемсон К.И., Ахесон Д.Т., Струне Б.Н. Газовые двигатели ГД-100 и агрегаты на их базе. - Л.: Нефть, 1970. - 238 с.
65. Гемсон К.И. Газовые двигатели. - М.: Машиностроение, 1977. - 196 с.
66. Гетманен Г.В., Лисанов В.А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта. - М.: Аспол, 1993. - 330 с.
67. Гельмгаднов Л.П. Кинетика и механизм образования сажи при термическом разложении углеводородов в газовой фазе // Химия твердого топлива. - 1972. - № 3. - С. 103-111.
68. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. - М.: Наука, 1969. - 222 с.
69. Гавстон С., Лейдлер К., Эйрэнг Г. Теория абсолютных скоростей. - М.: Изд-во ин. лит., 1948. - 580 с.
70. Говорушенко Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. - М.: Транспорт, 1990. - 135 с.
71. Головин Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 176 с.: ил.
72. Головин Е.С. О константе скорости химической реакции и коэффициенте реакционного газообмена газификации углерода // Шестой Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву: Сб. мат.-Черноголовка, 1980. - С. 106-110.
73. Горбунов В.В., Патракальцев Н.И. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Изд-во РУДН, 1998. - 214 с.: ил.
74. Гордеев Б.Ф., Шеленин Л.А., Шмоткин Ю.С. Аналитическая модель сажеобразования // ФТГ. - 1982. - № 2. - С. 71-76.
75. Горение углерода / А.С. Предводителев, Л.Н. Хитрин, О.А. Цуханова, Х.И. Колодиль, М.К. Гродовский. - М.: Изд-во АН СССР, 1949. - 254 с.
76. ГОСТ Р 41.49-2003 (Правил ЕЭК ООН № 49). Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 147 с.
77. ГОСТ 27577-2000 Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. - М.: Изд-во стан-

- двигателей, 2001. - 7 с.
78. Гоц А.Н., Машарехо И.П., Моисеева В.Н. Тенденция развития автомобильных и тракторных двигателей за рубежом // Двигательостроение. - 1992. - № 8-9. - С. 65-67.
79. Григорьев Е.Г., Колубася Б.Д., Ерохов В.И. Газобаллонные автомобили. - М.: Машиностроение. - 1989. - 216 с.
80. Гриншпан А.З., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Аналитическая модель факела распыленного жидкого топлива в неоднородной газовой среде // Тр. ЦНБТА. Вып. 64. - 1975.
81. Гудиев С.А. Сжатый газ как моторное топливо // Автомобильная промышленность. - 1995. - № 2. - С. 28-30.
82. Гурвич А.М., Шаулов Ю.Х. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. - М.: МГУ, 1995. - 167 с.
83. Гуревич Н.А., Лаврентьев Е.М. Определение температуры горения по содержанию окислов азота и градиенту температуры в продуктах сгорания // Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения их выброса в атмосферу: Сб. науч. тр. - Киев: Знание, 1974. - С. 16-19.
84. Гусаров А.П., Вайсблом М.Е., Соколов М.Г. Газ как средство трюбованый «Евро-2» // Автомобильная промышленность. - 1997. - № 11. - С. 27-29.
85. Даниев К. Применение статистики в промышленном эксперименте. - М.: Мир, 1979. - 299 с.
86. Девятьяров Р.Р. Особенности процесса смесеобразования в цилиндре газодизеля при впрыскивании дизельного топлива через многодырчатую форсунку // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Высшая ГСХА, 2003. - С. 41-46.
87. Девятьяров Р.Р., Лопатин О.П., Ляханов В.А. Феноменология горения дизельного топлива, впрыскиваемого через многодырчатую форсунку в МВС цилиндра газодизеля // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Высшая ГСХА, 2003. - С. 46-52.
88. Девч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. - М.: Энергия, 1968. - 315 с.
89. Духови: Справочник. - 3-е изд. / Под ред. В.А. Ванштейна, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова. - Л.: Машиностроение, 1977. - 480 с.
90. Динамика образования сажевых частиц в пламени при сжигании распыленного жидкого топлива / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, В.Н. Козленко, Е.А. Ефремова // Промышленная теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 3. - С. 95-97.
91. Долганов К.Е. Автомобильные газодизели // Двигательостроение. - 1995. - № 5. - С. 6-10.
92. Долганов К.Е., Вербовский В.С., Кубенко С.Б. Перевод на газодизельный процесс двигателей ЯМЗ-240, -240Н // Альтернативные топлива в дви-

- гателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 78.
93. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Колесник Ю.И. Система питания и регулирования для переоборудования дизелей в газодизели // Двигательостроение. - 1999. - № 1. - С. 37-40.
94. Долганов К.Е., Поляков А.П., Парсадинов И.В. Газовые двигатели с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. - 1996. - № 2. - С. 6-8.
95. Долганов К.Е., Сизюко Ю.В. Переоборудование автомобильных дизелей ЯМЗ-236, -258 в газодизели // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 76-77.
96. Дружинин Л.И. Использование газа в котлах и технологических установках. - М.: Недра, 1973. - 262 с.
97. Дубленский В.И. Альтернативные методы нейтрализации отработавших газов дизелей // Двигательостроение. - 1992. - № 5. - С. 10-11.
98. Дьяченко Н.Х., Батурич С.А., Ложкин В.Н. Исследование температуры и лучистой способности турбулентного сажевого пламени в окислительных процессах сгорания // Теплоэнергетика: Тр. ЛПИ. - Л., 1977. - № 358. - С. 96-100.
99. Дьяченко Н.Х., Батурич С.А., Ложкин В.Н. Сажевыделение в цилиндрах дизельных двигателей и дымность отработавших газов // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: Межвуз. сб. науч. тр. - Л., 1977. - С. 85-91.
100. Дьяченко Н.Х., Пугачев Б.П., Баранов В.Г. О расчете процессов массо- и теплопереноса при смесеобразовании и сгорании в цилиндре дизелей // Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания. - М., 1978. - С. 4-5.
101. Дьяченко Н.Х., Пугачев Б.П., Баранов В.Г. Процессы массо- и теплопереноса при смесеобразовании и сгорании в цилиндре дизелей // Тр. ЛПИ. - 1977. - № 358. - С. 105-109.
102. Дюкова Е.А. Экологическая безопасность - направление стратегического // Автомобильный транспорт. - 1999. - № 4. - С. 10-11.
103. Егоров А.В. Газобаллонный КамАЗ. - М.: Машиностроение, 1992. - 250 с.
104. Еремин Е.Н. Основы химической кинетики. - М.: Высшая школа, 1976. - 256 с.
105. Ермолович И.В., Ностов Н.И., Тимофеев В.Е. Перспективный малотоксичный дизель с двухстадийным способом смесеобразования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2001. - № 2. - С. 20-22.
106. Ефремов И.Ф., Митневский Д.Д. Метод анализа топливной экономичности поршневых ДВС // Двигательостроение. - 1986. - № 10. - С. 3.
107. Жигалов О.И., Лузачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. - М.: Транспорт, 1985. - 120 с.

108. Жегалов О.И., Сайкин А.М., Фрошкель А.И. Методы снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей. - М.: ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1976. - 30 с.
109. Завяжгаев Л.С., Кипляк А.А., Романков В.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
110. Зайдел А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. - Л.: Наука, 1967. - 88 с.
111. Зайчик Л.И., Першуков В.А. Турбулентное горение мелкодисперсного твердого топлива // Теплоносители в химических реагирующих системах: Мат. Межд. форума по теплообмену. - Минск, 1988. - С. 74-76.
112. Захаров А.И., Иванков В.В. и др. Разработка комбинированного топливодородного питания для улучшения экологических характеристик автомобиля // Альтернативная энергетика и экология. - 2002. - № 2. - С. 13.
113. Звонков В.А. Методика расчета образования окислов азота в цилиндре карбюраторного двигателя // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков: ХГУ, 1977. - Вып. 27. - С. 65-70.
114. Звонков В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.
115. Звонков В.А., Занграев Л.С., Азарова Ю.В. Относительная агрессивность вредных веществ и суммарная токсичность отработавших газов // Автомобильная промышленность. - 1997. - № 3. - С. 20-22.
116. Звонков В.А., Козлов А.В., Кутнев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. - НАМИ, 2001. - 248 с.
117. Звонков В.А., Козлов А.В., Терезченко А.С. Экология: Альтернативные топлива. Перспективы промышленности // Автомобильная промышленность. - 2001. - № 4. - С. 10-12.
118. Звонков В.А., Фурса В.В. Методика расчета окислов азота в цилиндре дизеля // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков: ХГУ, 1976. - Вып. 24. - С. 107-115.
119. Зельдович Я.Б., Садонников П.А., Франк-Каминский Д.А. Окисление азота при горении. - М. - Л.: АН СССР, 1947. - 148 с.
120. Зельдович Я.Б., Франк-Каминский Д.А. Теория тлевого распространения пламени // ЖФХ. - 1938. - Т. 12. - Вып. 1.
121. Зимонт В.Л. Горение гетерогенных и газовых систем. - Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. - С. 76-80.
122. Иванов К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводородов. - М. - Л.: Гостехиздат, 1949. - 216 с.
123. Иващенко Н.И., Семенов Б.Н., Соколов В.С. Рабочие процессы дизелей с камерой в поршне. - Л.: Машиностроение, 1972. - 228 с.
124. Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З. Многозонные модели рабочего процесса ДВС. - М., 1997. - 197 с.
125. Ивлева И.Н. Всемирная автобусная выставка // Автомобильный транс-

- порт. - 2006. - № 2. - С. 29-33.
126. Исаев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных силовых сред. - М.: Наука, 1975. - 256 с.
127. Изучение распределения сажевых частиц при сгорании растленного жидкого топлива / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, А.Г. Пизта, Е.А. Ефремова // Промышленная теплотехника. - 1988. - Т. 10. - № 3. - С. 84-88.
128. Иост В. Взрывы и горение в плазах. - М.: Изд-во ин. лит., 1952. - 668 с.
129. Ивуш К.С. Оценка дымовых газов от окислов азота // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. - 1980. - № 3. - С. 149-154.
130. Ипатов А.А., Эфанов А.А. О реализации в среднесрочной перспективе (2005-2008 гг.) приоритетных задач, предусмотренных «Концепцией развития автомобильной промышленности России» // Автомобиль и техносфера: Мат. IV Межд. науч.-практ. конф. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 29-48.
131. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б.С. Стефановский, Е.А. Скобинов, Е.К. Корси и др. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
132. Исследование процессов образования и разложения окислов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, В.Г. Мохнаткин, М.А. Олейник. - Киров: Вятская ГСХА, 2006. - 127 с.
133. Исследование рабочих процессов в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5: Монография / В.А. Лиханов, Р.Р. Дельтеярлов, О.П. Лопатин, П.Н. Вылегжанин. - Киров: Вятская ГСХА, 2004. - 330 с.
134. Исследование топливной экономичности и токсичности отработавших газов газодизеля / К.Е. Долганов, В.С. Вербовский, С.А. Ковалев и др. // Двигателестроение. - 1991. - № 8-9. - С. 6-9.
135. Исследование эмиссионных характеристик факела при горении жидких топлив / М.В. Страдомский, Е.П. Васильев, В.И. Колзено, Е.А. Ефремова // Теплофизика и теплотехника: Респ. сб. - Киев: Наукова думка, 1975. - Вып. 29. - С. 18-23.
136. Истомина С.В., Стрельников В.А. Новые направления повышения экологической безопасности ДВС // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. научн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 191-192.
137. Истратов А.Г., Лыбрович В.В. Устойчивость пламени. - М.: Академиздат, 1966. - 208 с.
138. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. - М.: Изд-во МГУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 592 с.
139. Казаров Н.А., Масленникова А.П. Экологическая безопасность транспорта // Автобизнесмаркет. - 2004. - № 14. - С. 4-7.
140. Калужин С.А., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Распределение жидкого топлива в объеме дизельного факела // Двигателестроение. - 1980. - № 8. - С. 6-8.

141. Кадужин С.А., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Экспериментальное исследование скорости движения жидкой и газообразной фаз в дизельном топливном факеле // *Двигателестроение*. - 1980. - № 7. - С. 5-8.
142. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. - М.: Химия, 1975. - 584 с.
143. Каринский В.В. Экологическая безопасность страны // *Автомобильный транспорт*. - 2006. - № 1. - С. 25-29.
144. Каринский В.В., Валеев Д.Х., Фучкин С.В. Опыт эксплуатации газодизельных КамАЗов // *Автомобильная промышленность*. - 1992. - № 8. - С. 20-21.
145. Каринский В.В., Тер-Мергичян Г.Г. Газодизельные автомобили НАМИ // *Автомобильная промышленность*. - 1993. - № 10. - С. 27-30.
146. Каринский В.В., Филиппович Т.Р. Газодизельные модификации // *Автомобильная промышленность*. - 1988. - № 11. - С. 26-28.
147. Кассандрова О.И., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Наука, 1970. - 104 с.
148. Катализаторы горения для бензинов и дизельных топлив / Д.В. Сердюк, В.В. Сердюк, Л.А. Ашкнияз, А.М. Давоков // *Автомобильная промышленность*. - 2001. - № 5. - С. 23-24.
149. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / О.И. Желанин, Н.А. Китросская, В.И. Панчинский и др. - М.: Машиностроение, 2002. - 97 с.
150. Кинетика сажеобразования из газообразных углеводородов / В.Г. Кнорре, А.И. Прихоженко, А.Я. Дубовицкий, Г.Б. Манелис // *Шестой Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву: Сб. мат.* - Черноголовка, 1980. - С. 75-78.
151. Кнорре В.Г., Каменщикова В.И., Ляхов А.Г. Образование сажи при термическом разложении ацетилена в условиях ударной трубы // *Физика горения и взрыва*. - 1980. - Т. 16. - № 2. - С. 89-92.
152. Кокурин А.Д. Химические процессы в углеводородных пламенах. - В кн.: *Процессы горения в химической технологии и металлургии*. - Черноголовка, ОНХФ АН СССР, 1975. - С. 217-226.
153. Кодик А.Н. Остановить экологическую угрозу // *Автомобильный транспорт*. - 2004. - № 2. - С. 32-35.
154. Коллеров Л.К. Газовые двигатели поршневого типа. - Л.: Машиностроение, 1968. - 247 с.
155. Коллеров Л.К. О развитии газовых поршневых судовых двигателей большой мощности // *Энергомашиностроение*. - 1973. - № 12. - С. 46-47.
156. Кондратьев В.Н. Кинетика химических газовых реакций. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 688 с.
157. Кондратьев В.Н. Константы скорости газофазных реакций. - М.: Наука, 1970. - 352 с.
158. Кондратьев В.Н. Свободные радикалы - активная форма вещества. -

- М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 54 с.
159. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. - М.: Наука, 1974. - 558 с.
160. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Химические процессы в газах. - М.: Наука, 1981. - 321 с.
161. Концепция управления экологической безопасностью АТС / А.П. Гусakov, М.Е. Вайсblем, В.В. Доченко, Ю.И. Кузин // *Автомобильная промышленность*. - 1999. - № 3. - С. 8-11.
162. Красовский О.Г., Матвеев В.В. Численное моделирование рабочего процесса дизелей, газовых двигателей в газодизелях // *Двигателестроение*. - 1990. - № 11. - С. 11-13.
163. Кратко А.П., Вихерт М.М., Грудский Ю.Г. Влияние фаз процесса сгорания в дизеле на содержание конденсированных компонентов в отработавших газах // *Автомобильная промышленность*. - 1977. - № 6. - С. 9-12.
164. Кратко А.П., Филиппович Т.Р. Перспективы автомобильных газодизелей // *Автомобильная промышленность*. - 1994. - № 2. - С. 9-10.
165. Крестинин А.В. Кинетическая модель сажеобразования из ацетилена в разбавленных смесях при температуре выше 1600 К // *Химическая физика*. - 1987. - Т. 6. - № 3. - С. 342-349.
166. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. - Л.: Недра, 1986. - 280 с.
167. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1988. - 360 с.
168. Коандопуло Г.И. Химия пламени. - М.: Химия, 1980. - 241 с.
169. Коандопуло Г.И., Дубинин В.В. Химия газофазного горения. - М.: Химия, 1987. - 240 с.
170. Кудриш А.П., Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Исследования рабочего процесса газодизеля // *Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.* - Киров, 1988. - С. 75.
171. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность в горении. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
172. Кузнецов И.В. Экологические показатели серийного форкамерного ДВС: резервы улучшения // *Автомобильная промышленность*. - 2005. - № 4. - С. 9-11.
173. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. - Киров: ООО «Фирма «Полюс», 2004. - 231 с.
174. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология смешесобразования в топливном факеле, вприскиваемом в метано-воздушную среду цилиндра газодизеля // *Регионалы. науч.-техн. конф. «Наука - производство - технология - экология»*: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т. 2. - С. 138-140.
175. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология воспламенения метано-воздушной среды в цилиндре газодизеля // *Регионалы. науч.-техн. конф.*

- «Наука - производство - технология - экология»: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т. 2. - С. 140-141.
176. Кузюшкин В.Л., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Экспериментальное исследование с помощью голографии нестационарной струи распыленного дизельного топлива // *Двигателестроение*. - 1989. - № 2. - С. 3-7.
177. Кульчицкий А.Р. К вопросу о расчетном определении эмиссии частиц с обработанными газами дизелей // *Двигателестроение*. - 2000. - № 1. - С. 31-38.
178. Кульчицкий А.Р. Разработка модели и исследование образования окислов азота в дизеле: Автореф. дисс. канд. техн. наук / МАДИ. - М., 1982. - 16 с.
179. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Академический Проект, 2004. - 400 с.
180. Кульчицкий А.Р., Эфрос В.В. Транспорт и «парниковые газы» // *Автомобильная промышленность*. - 2005. - № 6. - С. 5-8.
181. Кумган С. Горение. - М.: Химия, 1979. - 255 с.
182. Кутнев В.П., Свиридов Ю.Б. Экологические проблемы автомобильного двигателя и путь оптимального решения их // *Двигателестроение*. - 1990. - № 10. - С. 55-62.
183. Кутнев В.Ф., Звонков В.А., Коринков Г.С. Научно-технические проблемы улучшения экологических показателей автотранспорта // *Автомобильная промышленность*. - 1998. - № 11. - С. 7-11.
184. Кутнев В.Ф., Каменев В.Ф., Никитин И.М. Экологически чистые альтернативные топлива. Перспективы применения // *Автомобильная промышленность*. - 1997. - № 11. - С. 24-25.
185. Кутевой В.А. Выпуск топлива в дизелях. - М.: Машиностроение, 1981. - 118 с.
186. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива. - М.: Наука, 1971. - 275 с.
187. Лавров Н.В. и др. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. - М.: Мир, 1981. - 240 с.
188. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. - М.: Металлургия, 1981. - 258 с.
189. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. - М.: Наука, 1965. - 203 с.
190. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. - М.: Гостехиздат, 1954. - 795 с.
191. Лобедев С.В. Выбор основных параметров конструкции и регулирование дизелей типоразмера с учётом ограничения эмиссии NO<sub>x</sub> в ОГ // *Двигателестроение*. - 1996. - № 1. - С. 34-36.
192. Лавашенко Г.И., Симоньков С.В., Антулевич В.И. Определение размеров и содержание частиц сажи в продуктах горения керосина // *Физика горения и взрыва*. - 1986. - Т. 22. - № 6. - С. 108-112.
193. Ливичак И.Ф. Охрана окружающей среды. - М.: Недра, 1995. - 270 с.

194. Лиханов В.А. Вместо дитоплива - природный газ // *Сельский механик-автор*. - 1996. - № 11. - С. 28.
195. Лиханов В.А. Использование природного газа в качестве моторного топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межауз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 16-21.
196. Лиханов В.А. Мощностные, экономические и токсические показатели дизели Д-3900 при работе на природном газе // *Технические средства для ресурсосберегающих технологий в растениеводстве и животноводстве: Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока*. - Киров, 1997. - С. 210-218.
197. Лиханов В.А. Определение некоторых показателей углеродных комплексов при горении метановоздушной среды в цилиндре газодизеля // *Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России: Мат. II Межд. науч.-практ. конф.* В 3 т. - Киров, 2000. - Т. 2. - С. 162-165.
198. Лиханов В.А. Основные направления трендовых исследований по переводу на природный газ тракторных дизелей малой размерности // *Совершенствование технологий и технологических средств при интенсификации сельскохозяйственных процессов: Тез. докл. науч. конф. ВГСХА*. - Киров, 1997. - С. 33-35.
199. Лиханов В.А. Особенности горения дизельного топлива в цилиндре газодизеля // *Совершенствование процессов механизации и использование энергии в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. ВГСХА*. - Н.-Новгород, 2000. - С. 287-291.
200. Лиханов В.А. Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей. - Киров: Вятская ГСХА, 2002. - 280 с.
201. Лиханов В.А. Разработка и создание семейства глобальных тракторов и моторчиков для работы на сжатом природном газе // *Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России: Материалы II-й Межд. науч.-практ. конф.* В 3 т. - Киров, 2001. - Т. 3. - С. 98-108.
202. Лиханов В.А. Результаты исследований работы дизелей сельскохозяйственных тракторов на сжатом природном газе // *Энергосберегающие технологии и технические средства механизации животноводства Северо-Востока России: Сб. тр. науч.-практ. конф.* - Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1999. - Т. 2. - С. 145-152.
203. Лиханов В.А. Старание и сискобразование в цилиндре газодизеля. - Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. - 104 с.; ил.
204. Лиханов В.А. Структура сажи, образующейся в цилиндре газодизеля // *Совершенствование технологий и технических средств в сельскохозяйственном производстве: Тез. докл. науч. конф. инж. факульт. ВГСХА*. - Киров, 1999. - С. 60-62.
205. Лиханов В.А. Феноменологическая модель горения дизельного топли-

- на, вырванного в МВС цилиндра газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергии в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА. – Н-Новгород, 2000. – С. 291-297.
206. Лиханов В.А. Химизм высокотемпературного окисления метана при горении в цилиндре газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергии в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА. – Н-Новгород, 2000. – С. 297-301.
207. Лиханов В.А., Анфилатов А.А., Рудаков Л.В. Влияние генерации турбулентности на закономерности образования токсичных веществ в углеводородных пламенах // Улучшение эксплуатационных показателей ДВС: Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 72-85.
208. Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р. Двумерная модель неустойчивости пламени, распространяющегося во вращающемся газе // Улучшение эксплуатационных показателей мобильной энергетики: Мат. 12-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Киров, 2001. – С. 3-13.
209. Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р., Лопатин О.П. Феноменология горения дизельного топлива, вырванного через многодырчатую форсунку в МВС цилиндра газодизеля // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2003. – С. 46-52.
210. Лиханов В.А., Кузьмин В.А. Рост, коагуляция и агрегация сажевых частиц в цилиндре газодизеля // Совершенствование технологий и технических средств в сельскохозяйственном производстве: Тез. докл. науч. конф. инж. факульт. ВГСХА. – Киров, 1999. – С. 67-69.
211. Лиханов В.А., Лопарев А.А., Рудаков Л.В. Исследование процессов сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 129 с.
212. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Образование и нейтрализация оксидов азота в цилиндре газодизеля: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2004. – 106 с.
213. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Эффективность применения рециркуляции охлажденных отработавших газов для снижения эмиссии оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на сжатом природном газе // Улучшение технико-эксплуатационных показателей мобильной техники: Мат. 13-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Н-Новгород: НГСХА, 2003. – С. 109-114.
214. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Влияние различных факторов на содержание оксидов азота в отработавших газах дизелей // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания:

- Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. – Вып. 3. – С. 87-90.
215. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Исследование показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при работе с рециркуляцией ОГ на номинальном режиме // Совершенствование конструкции, теории и расчета тракторов, автомобилей и двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. юбилейной XV региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2004. – С. 97-99.
216. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Исследование содержания оксидов азота и динамики тепловыделения в цилиндре газодизеля 4ЧН 11,0/12,5 // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 137-140.
217. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Математическая модель для расчета скоростей реакции образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Роль науки в формировании специалиста: Сб. тр. науч.-практ. конф., Вып. 4. – М.: Изд-во МГОУ, 2006. – С. 43-47.
218. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Особенности химизма и феноменологии образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – № 11. – С. 13-16.
219. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Теоретические предположения для расчета скоростей реакции образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 40-51.
220. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Россохин А.В. Эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе с рециркуляцией ОГ на режиме максимального крутящего момента в зависимости от изменения нагрузки // Совершенствование конструкции, теории и расчета тракторов, автомобилей и двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. юбилейной XV региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2004. – С. 89-90.
221. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Рудаков Л.В. Показатели токсичности дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при работе с рециркуляцией ОГ на режиме максимального крутящего момента // Совершенствование конструкции, теории и расчета тракторов, автомобилей и двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. юбилейной XV региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2004. – С. 100-102.
222. Лиханов В.А., Мохнаткин В.Г., Россохин А.В. Исследование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонадувом

4ЧН11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 124 с.

223. Лиханов В.А., Рудаков Л.В. Особенности структуры растгиваемых плазм в метано-воздушных смесях // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межауз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 65-72.

224. Лиханов В.А., Рудаков Л.В. Особенности турбулентного горения метано-воздушной среды в цилиндре газодвигателя с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межауз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 51-65.

225. Лиханов В.А., Рудаков Л.В., Лопатин О.П. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения автомобильного дизеля 4ЧН11,0/12,5. // Повышение эффективности использования автотракторной и сельскохозяйственной техники: Межауз. сб. науч. трудов XVI региональной науч. – практ. конференции вузов Поволжья и Предуралья. – Пенза, ПГСХА 2005. – С. 203-207.

226. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – 2-е изд., испр. в доп. – М.: Колос, 1994. – 224 с.: ил.

227. Lihanov V., Lopatin O., Rossokhin A. Estimation of operational effectiveness of natural gas and recirculation of exhaust gases for a decrease toxicity of a diesel engine 4F 11,0/12,5 // Inzynieria Systemow Bioagrotechnicznych - Zeszyt 5. - Plock, 2005. - S. 79-82.

228. Литтл Т.М., Хиллс Ф.Дж. Сельскохозяйственное дело. Планирование и анализ: Пер. с англ. – М.: Колос, 1981. – 320 с.

229. Ловачев Л.А. Кинетика образования NO<sub>x</sub> в метано-воздушных плазмах // Химическая физика, 1983. – № 8. – С. 1085-1091.

230. Ложкин В.И. Испытания автомобилей в условиях производства и эксплуатации: испытания транспортных средств применительно к оценке экологических характеристик // Сырочно-методическое и учебное пособие. – СПб.: НПЦ Атмосфера при ГТО им. А.И. Воейкова, 2003. – 300 с.

231. Ложкин В.И., Батурицын С.А. Об области и характере протекания процесса кинификации углеродных частиц применительно к условиям сгорания в дизеле // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Сб. науч. тр. - Барнаул, 1985. – С. 70-83.

232. Лозинский О.К., Атоян К.Н. На газе выгоднее. Техничко - экономические показатели газовых автобусов Львовского автобусного завода // Автомобильный транспорт. – 2004. – № 3. – С. 50-51.

233. Лопатин О.П., Олейник М.А. Особенности процесса образования оксидов азота в цилиндре газодвигателя с наддувом при работе с рециркуляцией отработавших газов // Наука нового века - знания молодых: Мат. 4-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2004. - С. 101-103.

234. Лопатин О.П., Россохин А.В., Аифлятов А.А. Рециркуляция отработавших газов как средство снижения токсичности дизельного 4Ч11,0/12,5 // XII Тулолевские чтения: Мат. Межд. молодежной науч. конф. - Казань: КГТУ, 2004. - Т. 1. - С. 164-165.

235. Лопатин О.П., Россохин А.В., Олейник М.А. Индикаторные диаграммы тракторного дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на природном газе с рециркуляцией отработавших газов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межауз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. – Вып. 3. – С. 104-107.

236. Лушпа А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

237. Лытневский А.С. Системы питания дизелей. – М.: Машиностроение, 1981. – 215 с.

238. Львов Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Кондратьева. – М.: Мир, 1968. – 592 с.

239. Магарил Р.З. Механизм и кинетика гомогенных термических превращений углеводородов. – М.: Химия, 1970. – 224 с.

240. Макаров В.В. Полициклические ароматические углеводороды – зародыши сложных частиц // Совершенствование и развитие мобильной энергетики в сельском хозяйстве: Тез. докл. 10-й науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. – Чебоксары, 1998. – С. 144-146.

241. Макаров В.А., Шатров В.И. Показатели дизеля при совместном управлении топливно- и воздухоподачей // Автомобильная промышленность. – 1998. – № 6. – С. 10-11.

242. Максимов Е.А., Палита А.Г., Ефремов Е.А. Зависимость интенсивности лучистого теплопереноса от дисперсного состава продуктов сгорания жидкого топлива // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Казань, 1987. - С. 86.

243. Малов Р.В. Рабочие процессы и экологические качества ДВС // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 9. – С. 10-15.

244. Малов Р.В. Механизм воспламенения низкооктановых дизельных топлив // Автомобильная промышленность. – 1994. – № 10. – С. 11-14.

245. Малов Р.В., Никонен С.В. Снижение образования окислов азота в цилиндрах дизелей изотермического подвижного состава // Эффективность ДВС / Сб. науч. трудов. – М.: ВЗМН, 1981. – С. 67-77.

246. Малдеев В.И., Малдеев М.И., Капторов Л.Я. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1977. – 320 с.: ил.

247. Мамедов М.Д., Васильев Ю.И. Транспортные двигатели на газе. – М.: Машиностроение, 1994. – 224 с.

248. Мархов В.А. Методы снижения токсичности отработавших газов дизелей транспортного назначения // Известия вузов. Машиностроение. – 1993. – № 10-12. – С. 74-83.

249. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 376 с., ил.
250. Марков В.А., Кислов В.Г., Хватов В.А. Характеристики топливозадачи транспортных дизелей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. - 160 с., ил.
251. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливозадача многотопливных и газодизельных двигателей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 296 с.
252. Маршгейн Дж. Г. Нестационарное распространение пламени / Пер. с англ. - М.: Мир, 1968. - 438 с.
253. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Ливорвич, Г.М. Махиладзе. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
254. Математическое моделирование процессов саженообразования и радиационного теплообмена в дизелях / С.А. Батурина, А.С. Лоскутов, В.А. Спшицын, В.А. Курочкин // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1983. - № 394. - С. 23-29.
255. Матвеевский Д.Д., Свищула А.Е. Исследование системы питания дизеля для работы на газообразном и жидком топливе // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 80.
256. Матвеевский Д.Д., Свищула А.Е., Семачин П.К. Задержка воспламенения двухкомпонентного топлива в газодизеле и в дизеле, работающем на спиртах: Мат. Межд. науч.-техн. конф. «Двигатель-97». - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. - С. 116-118.
257. Матвеевский Д.Д., Семачин П.К., Свищула А.Е. Моделирование жесткой работы газодизеля как задачи о самовоспламенении локального объема // Двигательстроение. - 1998. - № 4. - С. 16-18.
258. Мачульский Ф.Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи // Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Лаборатория нейтрализации и проблем энергетика автомобилей и тракторов ЦНИГА, 1966. - С. 208-217.
259. Мелькумов Т.А. Теория быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия. - М.: Оборонгиз, 1953. - 407 с.
260. Мысланден Р.К. Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи // Измерения температуры в объектах новой техники. / Пер. с англ. М., 1965. - С. 152-172.
261. Мюнкен И.М., Каринский В.В. Газодизель - силовая установка XXI века // Автомобильная промышленность. - 2002. - № 5. - С. 4-8.
262. Михайлов В.А., Трелина К.В. Снижение токсичности выбросов дизелей тракторов малых классов. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2003. - № 3. - С. 18-20.
263. Михайлов И.Д., Шаповалов М.Э., Каграмян А.А. Экспериментальные и

- аналитическое определение запальной дозы дизельного топлива для осуществления газодизельного цикла // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 79.
264. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. - Л.: Недра, 1966. - 327 с.
265. Михеев В.П. Сжигание природного газа в промышленных установках. - Л.: Гостотехиздат, 1962. - 232 с.
266. Михеев В.П., Мелиников Ю.П. Сжигание природного газа. - Л.: Недра, 1975. - 391 с.
267. Мищенко А.И., Белозуб А.В. Применение водорода для двигателей автомобильного транспорта // Атомно-водородная энергетика и технология: Сб. статей. - 1998. - Вып. 8.
268. Модзалевская М.Л. Тепловое излучение частиц углерода в светящихся сажевых пламенах: Дис. канд. техн. наук. - М., 1971. - 141 с.
269. Модзалевская М.Л., Блох А.Г. О влиянии спектра размеров частиц сажевого углерода на излучение светящегося пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - № 3. - С. 63-67.
270. Морев А.И., Пеханов И.П. Устройство и обслуживание газобаллонных автомобилей. - М.: ДОСААФ, 1987. - 141 с.
271. Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей. - М.: Изд-во «Легком-Автодата», 2001. - 80 с.
272. Натанзон М.С. Неустойчивость горения. - М.: Машиностроение, 1986. - 248 с.
273. Нельсон Н. Образование окиси азота при горении // Ракетная техника и космонавтика. - 1976. - Т. 14. - № 9. - С. 30-36.
274. Нетлеон М. Детонация в газах. Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 280 с.
275. Никитин С.С. Выброс окислов азота энергетическими котлами при сжигании топлив, содержащих химически связанный азот // Окислы азота в продуктах сгорания топлив: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 63-69.
276. Николаенко А.В., Капустин А.А. Особенности использования природного газа в качестве топлива для транспортных двигателей // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2006. - С. 28-33.
277. Николаенко А.В., Салова Т.Ю. Математическая модель образования и методики расчета концентрации оксидов азота в дизелях // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. - С.-Петербург: СПбГАУ, 1999. - С. 15-26.
278. Николаенко А.В., Салова Т.Ю. Моделирование и создание средств нейтрализации отработавших газов автотракторных дизелей // Двигательстроение. - 2000. - № 2. - С.39-41.



279. Николаенко А.В., Салога Т.Ю. Моделирование кинетики образования оксидов азота в дизелях // Двигателестроение. - 1998. - № 1. - С. 35-37.
280. Николаенко А.В., Салога Т.Ю., Шкрибак В.С. Состояние и некоторые пути улучшения экологических показателей сельскохозяйственных тракторов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. между науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 57-58.
281. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. - 2002. - № 2. - С. 23-27.
282. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей (продолжение) // Двигателестроение. - 2002. - № 3. - С. 32-34.
283. Нотыч А.Г., Панзратов В.Ф. - В кн.: Образование оксидов азота в процессе горения и пути снижения выброса их в атмосферу. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 93-101.
284. Обоснование выбора рециркуляции отработавших газов для снижения содержания оксидов азота в отработавших газах газодизеля / В.А. Лихачов, О.П. Лопатин, М.А. Озелькин, А.В. Россохин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 90-99.
285. Образование и выгорание сажи при сгорании углеродородных топлива / Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полицук, З.Г. Шайхутдинов. - М.: Машиностроение, 1989. - 128 с.
286. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. / Ред. Н.А. Чагир. - М.: Машиностроение, 1981. - 407 с.
287. Образование сажи при горении гомогенных гексановоздушных смесей при давлениях до 1,5 МПа / Ф.Г. Бакиров, Н.Х. Баширов, В.М. Захаров и др. // ФГВ. - 1982. - № 3. - С. 51-56.
288. Образование сажи при термическом разложении ацетилена в условиях ударной трубы / В.Г. Кнорре, В.И. Каменщиков, А.Г. Ляхов, Д.Т. Снегирев // ФГВ. - 1980. - № 2. - С. 89-92.
289. Озимец П.Л., Вагин В.К. Развитие конструкции дизелей с учетом требований экологии // Автомобильная промышленность. - 1998. - № 11. - С. 31-32.
290. Олейник М.А. Снижение содержания оксидов азота на двигателях с турбонаддувом путем применения рециркуляции отработавших газов // Науке нового века - званта млодзх: Материалы. 5-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 136-139.
291. Олейник М.А. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах автомобильного дизеля 4СН 11,0/12,5 при работе по газодизельному циклу // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская

- Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 141-147.
292. Олейник М.А. Эффективные показатели дизеля 4СН 11,0/12,5 при различных нагрузочных режимах на максимальном крутящем моменте и номинальной частоте вращения // Образование. Наука. Производство. Инновационный взлск: Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Чебоксарского ин-та (фил.) МГОУ. - Вып. 3. В 2-х томах. - М.: Изд-во МГОУ, 2005. - Т. 1. - С. 167-168.
293. Олейник М.А., Россохин А.В. Токсические показатели автомобильного дизеля 4СН 11,0/12,5 при работе на компримированном природном газе // Повышение эффективности использования автотракторной и сельскохозяйственной техники: Межвуз. сб. науч. тр. XVI региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Пенза: ФГОУ ВПО Пензенская ГСХА, 2005. - С. 213-216.
294. Основы горения углеводородных топлив / Под ред. Л.Н. Хитрина. - М.: Изд-во ин. Лит., 1960. - 664 с. из.
295. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.
296. Пантатар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 320 с.
297. Пантатар С., Споддинг Д. Тепло и массообмен в пограничных слоях. - М.: Энергия, 1971. - 125 с.
298. Перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо / Под ред. Д.Н. Вырובה. - М.: Машиз, 1946. - 239 с.
299. Перевод нефтяных двигателей на газообразное топливо / Под ред. Я.И. Коймаха, Ф.А. Парфентьева. - М.: Машиз, 1946. - 252 с.
300. Перспективы и проблемы перевода судовых дизелей на газовое топливо / Ю.В. Галышев, Л.Е. Магидович, Н.Н. Сивастюков, Н.Н. Фомина // Двигателестроение. - 1998. - № 1. - С. 8-9.
301. Петриченко Р.М., Олюсовский В.В. Рабочие процессы поршневых машин. - М.: Машиностроение, 1972. - 167 с.
302. Пинта А.Г., Ефремова Е.А. Теплоперенос излучением в двухфазной среде, ограниченной изотермическим цилиндром с тороидальной осью // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. второго Минского Между. форума по тепломассообмену. - Минск, 1992. - С. 100-103.
303. Подаяч и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусов, А.С. Хачиян и др. - М.: Машиностроение, 1972. - 367 с.
304. Похал П.Ф., Мальцев В.М., Зайцев В.М. Методы исследования процессов горения и детонации. - М.: Наука, 1969. - 296 с.
305. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайдуляни, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаренский. - М.: Недра. - 1986.
306. Проблемы и пути обеспечения конкурентоспособности отечественной техники / Р.Н. Минниханов, Б.П. Палатов, Г.Л. Дегтарев, Д.Х. Валово,

- Р.А. Гафуров // Автомобиль и техносфера: Мат. IV Межд. науч.-практ. конф. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 49-70.
307. Прошкин В.И. О химических превращениях в углеводородных топливах при сгорании в дизелях // Двигателестроение. - 1990. - № 2. - С. 58-59.
308. Рабочие процессы ДВС: Учебное пособие / Под ред. В.А. Вагнера, И.А. Иванченко, Д.Д. Матвеевского. - АлтГТУ им. И.И. Ползунова - Барнаул, 1995. - 185 с.
309. Равич М.В. Газ и его применение в народном хозяйстве. - М.: Наука, 1974. - 37 с.
310. Равагид А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели. - М.: Недра, 1976. - 196 с.
311. Радиационный теплообмен в цилиндре дизельного двигателя большой мощности / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, В.А. Асмаловский, В.С. Малаяков // Теплообмен излучением и сложный теплообмен: Материалы пятой Всесоюз. конф. по тепломассообмену. - Минск, 1976. - Т. 8. - С. 317-321.
312. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизеле. - Харьков: Высшая школа, 1980. - 169 с.
313. Разработка и исследование системы питания и регулирования газодизеля ЯМЗ-240ГД / К.Е. Долганов, В.С. Вербовский, Г.В. Кулич, С.Б. Кубенко // Химическая технология. - 1988. - № 5. - С. 13-15.
314. Разработка и исследование системы питания и регулирования газодизеля ЯМЗ-240Н1-ГД / К.Е. Долганов, В.С. Вербовский, А.И. Пятичнов, С.Б. Кубенко // Химическая технология. - 1989. - № 6. - С. 45-47.
315. Райзер Ю.П. Образование окислов азота в ударной волне при сильном взрыве в воздухе // ЖФХ. - 1959. - Т. 33. - № 3. - С. 700-709.
316. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания: Учебник для вузов. - М.: Высш. школа, 1975. - 320 с., ил.
317. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. № 1225-р. Экологическая доктрина Российской Федерации.
318. Результаты исследований двигателей КамАЗ, питаемых природным газом / В.Н. Луканин, А.С. Хачин, В.Е. Кузнецов, В.М. Федоров, И.Г. Шишков, Р.Х. Хамидуллин // Экология двигателя и автомобиля: Тр. НА-МН. - 1998.
319. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. - М.: Машино, 1960. - 409 с.
320. Розенфельд Э.И. Горелочные устройства для сжигания газа и других видов топлива с минимальным содержанием окислов азота в уходящих газах тепловых агрегатов. - М.: ВНИИЭгазпром, 1975. - 46 с.: ил.
321. Росляков П.В. Расчет образования топливных окислов азота при сжигании азотсодержащих топлив // Теплоэнергетика. - 1986. - № 1. - С. 37-41.
322. Россохин А.В. Влияние различных факторов на дымность отработав-

- ших газов дизеля // Мат. 5-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 77-79.
323. Россохин А.В. Зонаная модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межкуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 118-125.
324. Россохин А.В. Изменение эффективных и экономических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива // Сб. тр. науч.-практ. конф. пасажи, пассажи. 50-летию Чебоксарского ин-та (фил.) МГОУ, Вып. 3. В 2-х томах. - М.: Изд-во МГОУ, 2005. - Т. 1. - С. 165-166.
325. Россохин А.В. Измерение дымности отработавших газов // Мат. 5-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 75-77.
326. Россохин А.В. Особенности процесса образования сажи в цилиндре газодизеля с наддувом // Мат. 4-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2004. - С. 104-106.
327. Россохин А.В. Особенности методики проведения стендовых испытаний по оптимизации процесса сажеобразования в цилиндре газодизеля 4ЧН 11,0/12,5 // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межкуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 82-86.
328. Россохин А.В. Особенности образования канцерогенных веществ в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межкуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 153-159.
329. Россохин А.В. Особенности химизма образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межкуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 160-169.
330. Россохин А.В. Улучшение экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем снижения дымности отработавших газов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межкуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 126-130.
331. Россохин А.В., Деметриев Р.Р. Эффективные показатели автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе по газодизельному циклу // Повышение эффективности использования автотракторной и сельскохозяйственной техники: Межкуз. сб. науч. тр. XVI региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Пенза: ФГОУ ВПО Пензенская ГСХА,

2005. – С. 210-213.
332. Россохин А.В., Олейник М.А., Рудаков Л.В. Проведение стендовых испытаний автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом // *Мат. IV Межд. науч.-практ. конф. «Автомобиль и техносфера»*. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 178.
333. Рудаков Л.В. Влияние использования природного газа в качестве моторного топлива на индикаторные показатели автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 // *Науке нового века – знания молодым: Материалы 6-й науч. конф. аспирантов и соискателей*. – Киров, Вятская ГСХА, 2006. – Ч. 1. – С. 138-141.
334. Рудаков Л.В. Возможные пути улучшения эффективных и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 путем совместного применения природного газа и турбонаддува // *Науке нового века – знания молодым: Материалы докладов 5-й науч. конф. аспирантов и соискателей*. – Киров, ВГСХА, 2005. – Ч. 1. – С. 145-148.
335. Рудаков Л.В., Изменение эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения // *Образование. Наука. Производство. Инновационный аспект: Сб. тр. науч.-практ. конф., посвятив. 50-летию Чебоксарского ин-та (фил.) МГОУ*. Вып. 3. – М.: Изд-во МГОУ, 2005. – Т. 1. – С. 167-168.
336. Рудаков Л.В. Изменение эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем оптимизации процессов сгорания и тепловыделения // *Науке нового века – знания молодым: Материалы 6-й науч. конф. аспирантов и соискателей*. – Киров, Вятская ГСХА, 2006. – Ч. 1. – С. 141-144.
337. Рудаков Л.В. Индикаторные диаграммы автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при использовании природного газа в качестве моторного топлива // *Улучшение эксплуатационных показателей ДВС: Междуз. сб. науч. тр.* – С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 111-118.
338. Рудаков Л.В. Методика исследований работы дизеля с турбонаддувом на природном газе // *Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Междуз. сб. науч. тр.* – С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. – Вып. 3. – С. 99-103.
339. Рудаков Л.В. Методика проведения стендовых испытаний по улучшению эффективных и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 // *Совершенствование конструкции, теории и расчета тракторов, автомобилей и двигателей внутреннего сгорания: Междуз. сб. науч. тр. юбилейной XV региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья*. – Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2004. – С. 71-75.
340. Рябин В.А., Остроумов М.А., Свят Т.Ф. Термодинамические свойства веществ: Справочник. – Л.: Химия, 1977. – 392 с.
341. Салова Т.Ю. Моделирование и исследование процессов образования и

- нейтрализации оксидов азота дизелей. – С.-Петербург: Индикатор, 1998. – 80 с.
342. Салова Т.Ю. Моделирование процессов нейтрализации оксидов азота в различных условиях сгорания топлива // *Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф.* – С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. – С. 84-89.
343. Салова Т.Ю. Экологический мониторинг окружающей среды при эксплуатации автотракторных техники. – С.-Петербург: Индикатор, 1998. – 80 с.
344. Салова Т.Ю., Громова Н.Ю. Новое в природоохранном законодательстве // *Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф.* – С.-Петербург, 2002. – С. 398-402.
345. Самойлов Н.П., Игошкин В.И. Токсичность автотракторных двигателей и способы ее снижения. – Казань: КГУ, 1997. – 170 с.
346. Самоль Г.И., Гольдблат И.И. Газобаллонные автомобили. – М.: Машиностроение, 1963. – 285 с.
347. Самсонов Р.О. Комплексное исследование совместного дизельного и газодизельного рабочего процессов на базе одноцилиндрового отсека ОГД-100 // *Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.* – Киров, 1988. – С. 69.
348. Савицкий А.А. Основы теории ошибок. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1972. – 122 с.
349. Свиридов Ю.Б. Принципы построения обобщенной теории сгорания в дизелях // *Двигателестроение*. – 1980. – № 9. – С. 21-23.
350. Свиридов Ю.Б. Принципы построения обобщенной теории сгорания в дизелях (продолжение) // *Двигателестроение*. – 1980. – № 11. – С. 10-15.
351. Свиридов Ю.Б. Расчет испарения и температурно-концентрационной неоднородности в факеле распыленного топлива // *Тр. НАМИ*. – 1966. – Вып. 88. – С. 75-105.
352. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. – Л.: Машиностроение, 1972. – 224 с.: ил.
353. Свиридов Ю.Б., Гриншпан А.З., Романов С.А. О расчете испаряющегося дизельного факела // *Тр. ЦНИТА*. – 1977. – Вып. 69. – С. 3-12.
354. Свиридов Ю.Б., Малавинский Л.В., Вихерг М.М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
355. Свиридов Ю.Б., Скворцов В.А. Гомогенизация топливовоздушной смеси – основа прогресса ДВС // *Двигателестроение*. – 1982. – № 1. – С. 3-7.
356. Свиридов Ю.Б., Скворцов В.А. Гомогенизация топливовоздушной смеси – основа прогресса ДВС (продолжение) // *Двигателестроение*. – 1982. – № 2. – С. 3-6.
357. Свиридов Ю.Б., Тихонов Ю.В. Проблемы смесеобразования и сгорания в двигателях с внешним смесеобразованием // *Двигателестроение*. – 1988. – № 10. – С. 6-8.

358. Себеси Н., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. - М.: Мир, 1987. - 590 с.
359. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 685 с.
360. Семенов Н.Н. Развитие цепных реакций и теплового воспламенения. - М.: Знание, 1969. - 94 с.
361. Семенов Н.Н. Цепные реакции. - Л.: ОНТИ, Госхимтехиздат, 1934. - 555 с.
362. Сербинов А.И. Самовоспламенение растопленных жидких топлив // Статорные в транспортные поршневые двигатели. - М.: АН СССР, - 1951.
363. Сердюк О.В. Экология и автомобилестроение // Автостандарт.- 2004. - № 4. - С. 18-23.
364. Серковская Г.С. О канцерогенности нефти и нефтепродуктов // Химия и технология топлив и масел. - 1996. - № 1. - С. 39-45.
365. Сжигание горючих газов в топочных устройствах / Н.В. Лавров, В.М. Попов, Л.И. Истомин, А.К. Шубников. - Л.: Энергия, 1966. - 269 с.
366. Сигал А.И. Предотвращение образования диоксида азота в отопительных котлах: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Л., 1985. - 24 с.
367. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Недра, 1988. - 312 с.
368. Сигал И.Я. К вопросу образования окислов азота в процессах горения // Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 3-7.
369. Сигал И.Я. Образование окислов азота при сжигании топлива // Окислы азота в продуктах сжигания топлива: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 3-16.
370. Сигал И.Я., Гуревич Н.А., Лавренко Е.М. Образование окислов азота при ламинарном и турбулентном горении // Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1975. - Т. 4. - С. 513-521.
371. Сигал И.Я., Гуревич Н.А., Ляхоронский В.Г. Исследование минимального выхода окислов азота в пламени метана, окиси углерода и водорода // Использование газа в народном хозяйстве.-1980.-№ 2.- С. 23-27.
372. Система питания для газодизеля с двухрежимным регулятором частоты вращения / К.Е. Долганов, А.А. Лисовал, А.П. Поляков // Двигателестроение. - 2001. - № 3. - С. 29-31.
373. Смайлс В.И. Малотоксичные дизели. - Л.: Машиностроение, 1972. - 128 с.
374. Смайлс В.И. Проблемы снижения токсичности в дымности обрабатываемых газов дизелей // Двигателестроение. - 1979. - № 1. - С. 19-21.
375. Смайлс В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизельного двигателя // Двигателестроение. - 1991. - № 1. - С. 3-6.
376. Смайлс В.И. Теоретические и экспериментальные основы создания малотоксичных дизелей: Дис. докт. техн. наук / Ленингр. политехн. ин-

- т. - Л., 1988. - 464 с.; ил.
377. Создание газодизеля Д-144 для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с.-х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - № ГР 0188.0059777. - Киров, 1988. - 54 с.
378. Создание макетного образца погрузчика для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с.-х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - Киров, 1991. - 68 с.; прилож.
379. Создание макетного образца трактора Т-25А для работы на газе в качестве моторного топлива: Отчет о НИР (заключительный) / Киров, с.-х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - № ГР 0186.0037397. - Киров, 1987. - 57 с.
380. Создание макетного образца трактора «Уншкереал-445» для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с.-х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - № ГР 0188.0059778. - Киров, 1990. - 65 с.; прилож.
381. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газях. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 427 с.
382. Сорокин А. И., Мирзоев Г. К. Сравнительный анализ автомобильных двигателей внутреннего сгорания и энергоустановок на топливных элементах // Тез. докл. II Всерос. семинара «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН - Новосибирск, 2003.
383. Спиддинг Д.Б. Горение и массообмен: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1985. - 240 с.
384. Сравнительные кинетические расчеты турбулентного горения воздушных смесей водорода и метана / В.Я. Басевич, В.П. Володин, С.М. Когарко, Н.И. Перегудов // ФГВ. - 1986. - № 3. - С. 44-50.
385. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Исследование эмиссионных свойств пламени при импульсном сгорании жидких топлив в замкнутом объеме // Радиационный теплообмен: Тез. докл. пятый Всесоюз. науч.-техн. конф. - Ставрополь, 1982. - С. 126-127.
386. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Исследование эмиссионных свойств твердой дисперсной фазы пламени при импульсном сжигании жидких моторных топлив // Пром. теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 5. - С. 85-88.
387. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Коэффициент ослабления лучей потоком сажистых частиц в пламени при импульсном диффузионном сгорании жидких топлив в камере постоянного объема // Пром. теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 6. - С. 60-64.
388. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Лучистый теплообмен при импульсных режимах сгорания // Совершенствование теории и техники теплотехники энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Киев, 1987. - С. 84-85.
389. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Радиационные характеристики дисперсной фазы пламени при импульсном диффузионном сгорании жидких моторных топлив в замкнутом объеме // Промышленная теплотехника. -

1987. - Т. 9. - № 5. - С. 34-37.
390. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Радиационный теплообмен и эмиссионные свойства полидисперсной твердой фазы факела при импульсном сжигании жидкого топлива // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тез. докл. Минского Межд. форума по теплообмену. - Минск, 1988. - С. 27-29.
391. Страдомский М.В., Максимов Е.А. Оптимизация температурного состояния деталей дизельных двигателей. - Киев: Наук. думка, 1987. - 168 с.
392. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малахов В.С. Экспериментальное определение эмиссионных свойств пламени в циклическом рабочем процессе // Теплофизика и теплотехника: Респ. сб. - Киев: Наукова думка, 1979. - Вып. 37. - С. 26-30.
393. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малахов В.С. Экспериментальное исследование закономерностей сложного теплообмена при импульсном сжигании жидкого топлива в ограниченном объеме // Теплообмен в энергетических процессах и системах: Материалы шестой Всесоюз. конф. по теплообмену. - Минск, 1980. - Т. 8. - С. 36-39.
394. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малахов В.С. Исследование граничных условий теплообмена для ЦПГ дизеля с высоким наддувом // Двигателестроение. - 1980. - № 8. - С. 11-13.
395. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Васильев Е.П. Теплообмен при импульсном сгорании жидких моторных топлив // Двигателестроение. - 1987. - № 11. - С. 5-7.
396. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малахов В.С. Исследование лучистого теплообмена в цилиндре дизеля // Изв. вузов: Машиностроение, 1982. - № 1. - С. 88-92.
397. Строгов А.П., Кисленко В.В., Красинков Н.С. Особенности регулировки топливного насоса газодизеля // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 89.
398. Структура сажевых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива в прямооточной камере сгорания / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремова, В.И. Козленко // Пром. теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 4. - С. 75-78.
399. Структура сажевых частиц при горении распыленного керосина / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремова, В.И. Козленко, А.К. Дудченко // Промышленная теплотехника. - 1984. - Т. 6. - № 2. - С. 78-81.
400. Сун С., Халл Р.С. Двухтопливный режим работы предкамерного дизельного двигателя на природном газе // Тр. Амер. общества инженеров-механиков. - 1985. - № 4. - С. 60-68.
401. Таболин В.В., Серезкин А.М. Международный симпозиум «Газовое моторное топливо - топливо будущего» // Автомобильная промышленность. - 1992. - № 6. - С. 28-29.

402. Таран Э.Н. Влияние азотсодержащих соединений на образование сажи при горении // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепропетровск, 1986. - С. 75-86.
403. Таран Э.Н. Исследование структуры плоских диффузионных пламен на встречных струях спектроскопическим и нонлинейными методами // Структура газофазных пламен: Материалы Всесоюз. семинара по структуре газофазных пламен. - Новосибирск, 1984. - Ч. 2. - С. 123-143.
404. Таран Э.Н., Приняков В.Ф. Влияние внешнего электрического поля на спектр излучения и образование сажи при горении // Структура газофазных пламен: Материалы Межд. семинара по структуре газофазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Ч. 3. - С. 183-193.
405. Таран Э.Н., Приняков В.Ф. О природе сажи // Структура газофазных пламен: Материалы Межд. семинара по структуре газофазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Ч. 1. - С. 104-113.
406. Таран Э.Н., Шумриков В.В. О структурных особенностях плазмохимического угля // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепропетровск, 1986. - С. 137-145.
407. Терентьев Г.А., Токнов В.М., Смалд Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. - М.: Химия, 1989. - 272 с.
408. Теснер П.А., Кнорре Е.Г. Сажа из ацетилена // Процессы горения в химической технологии и металлургии. - Черноголовка: Ин-т хим. физики АН СССР, 1975. - С. 58-69.
409. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов в газовой фазе. - М.: Химия, 1972. - 128 с.: ил.
410. Теснер П.А. Образование сажи при горении // Физика горения и взрыва. - 1979. - Т. 7. - № 2. - С. 3-14.
411. Теснер П.А. Кинетика образования пироуглерода // Химия твердого топлива. - 1983. - № 5. - С. 111-118.
412. Титков А.И. От концепции - к стратегии развития автомобильной промышленности в первой четверти XXI века // Автомобильная промышленность. - 2005. - № 2. - С. 1-4.
413. Титков А.И. Природный газ - моторное топливо XXI века // Автомобильная промышленность. - 1998. - № 2. - С. 26-29.
414. Толшин В.И., Чуб Т.В., Якутчиков В.В. Рециркуляция ОГ как средство снижения оксидов азота судового дизель-генератора // Двигателестроение. - 2000. - № 4. - С. 20-21.
415. Трусов В.И., Иванов Л.Л. Некоторые предпосылки к формированию физической модели распыленной струи при впрыске топлива в дизеле. - В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. - Ярославль: Изд-во Яросл. политех. ин-та, 1975. - С. 31-39.
416. Трынов В., Паденко С., Фучкин С. Газодизель для КамАЗов // Автомобильный транспорт. - 1988. - № 11. - С. 39-43; 1989. - № 1. - С. 38-40.
417. Улучшение экологических показателей дизеля с турбонаддувом путем

- применения природного газа / В.А. Лиханов, А.В. Россохин, М.А. Олейник, Л.В. Рудakov // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2006. - № 9. - С. 8-10.
418. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, 1990. - 352 с.
419. Файнлейб Б.Н., Бараев В.И. Повышение эффективности смесеобразования в дизелях путем воздействия на динамику распыленной струи топлива // Двигателестроение. - 1986. - № 9. - С. 8-12.
420. Фастовский В.Г. Метан. - М.: Гостопиздат, 1947. - 153 с.
421. Федоров Н.А. Техника и эффективность использования природного газа в промышленности. - М.: ВНИИЭГазпром, 1970. - 94 с.
422. Феосенко П.П., Звинов В.А., Рыбальченко А.Г. Исследование процесса каталитического восстановления окислов азота в отработавших газах дизеля // Окислы азота в продуктах сжигания топлива: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 149-154.
423. Филипович Т.Р., Криво А.П., Мазинг М.В. Пути снижения вредных выбросов отработавших газов автомобильных двигателей. - М.: НИИНавтопром, 1979. - 64 с.
424. Филиппов А.З. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей. - Киев: Вища школа, 1980. - 160 с.
425. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М.: Наука, 1967. - 492 с.
426. Фристром Р.М., Вестенберг А.А. Структура пламени: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1969. - 363 с.
427. Фучкин С.В. Перевод двигателя на газодизельный процесс // Автомобильная промышленность. - 1999. - № 2. - С. 24-27.
428. Фучкин С.В., Гадлев С.А., Иванов Ю.В. Совершенствование системы газового питания 8-цилиндрового автомобильного газодизеля размерностью 12/12 с целью улучшения его показателей // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 82.
429. Хаустович Г.П. Методы подавления процессов образования окислов азота в топочных устройствах, сжигающих газ. - М.: Информэнерго, 1976. - 50 с.: ил.
430. Хачян А.С. Использование природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта // Двигателестроение. - 2002. - № 1. - С. 34-36.
431. Хватов В.Н., Логинов И.В. Пути снижения дымности отработавших газов дизелей // Двигателестроение. - 1991. - № 5. - С. 42-44.
432. Хинде И.О. Турбулентность. - М.: Академиздат, 1963. - 680 с.
433. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва. - М.: Изд-во МГУ, 1957. - 576 с.
434. Чертков Я.Б. Моторные топлива. - Новосибирск: Наука, 1987. - 208 с.
435. Чертков Я.Б. Неуглеводородные соединения в нефтепродуктах. - М.:

- Химия, 1964. - 283 с.
436. Чеслоков С.А. Сохраненный механизм горения метана в условиях ДВС // Актуальные проблемы управления качеством производства в эксплуатации автотранспортных средств: Мат. 9-й Межд. науч.-практ. конф. - Владимир, 2002. - С. 319-322.
437. Швецов В.А. Проблемы и перспективы перевода автомобильного транспорта на газомоторное топливо // Автомобиль и техносфера: Мат. IV Межд. науч.-практ. конф. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 71-74.
438. Шегалов И.Л. Экологическая роль транспортных двигателей // Двигателестроение. - 1986. - № 8. - С. 56-60.
439. Шейфэр Х.Ф. Неполное сгорание как возможная причина неустойчивости горения // Аэрокосмическая техника. - 1984. - Т. 2. - № 4. - С. 64-73.
440. Шклякова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях. - М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. - 64 с.
441. Шкрабак В.С., Николаенко А.В., Капустин А.А. Экономия жидкого дизельного топлива путем перевода дизелей на газодизельный процесс // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург, 2002. - С. 30-42.
442. Шоу Г. Уменьшение выбросов окислов азота из газотурбинной камеры в результате модификации топлива // Энергетические машины и установки. - М.: Мир, 1973. - № 4. - С. 87-94.
443. Штерн В.Я. Механизм окисления углеводородов в газовой фазе. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 496 с.
444. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. - М.: Академиздат, 1963. - 255 с.
445. Щетников Е.С. Физика горения газов. - М.: Наука, 1965. - 740 с.
446. Экспериментальное исследование структуры сажистых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива // М.В. Стреломский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремов, А.Г. Плига // Радиационный теплообмен в технике и технологии: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Казань, 1987. - С. 31-32.
447. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. - М.: Высшая школа, 1974. - 400 с.
448. Яковлев А.И., Найденов А.А. Взгляд на перспективы развития энергетических установок автомобилей // Автостроение за рубежом. - 1998. - № 10. - С. 11-12.
449. Alkidas A.C. Relationships between smoke measurements and particulate measurements // SAE Techn. Paper. Ser. - 1984. - № 840412. - 9 p.
450. Appleby A. The Electrochemical Engine for vehicles // Scientific Ameri-

- can. July 1999. - 112 p.
451. Chen T.N., Alford R.N. Combustion characteristics of large gas engines // *Pap. ASME*. - 1971. - P. 6-8.
452. Churchill R.A., Smith J.E., Clark N.N., Turton R.A. Low-Heat Rejections Engines - a concept review // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1989. - № 890153. - P. 25-36.
453. Daugas M. Pielstick tests on afb biogas diesels give promising results // *Mod. Power Syst.* - 1983. - № 2. - P. 43-45.
454. Dent J.C., Mehta P.S., Swan J. A predictive model for automotive DI diesel engine performance and smoke emissions // *Diesel Engines Passenger Cars and Light Duty Veh. Conf. London*, 5-7 Oct. 1982. - London, 1982. - P. 237-245.
455. Haynes B.S., Wagner H.G. Soot Formation. - «*Progr. Energy and Combustion Scis*», 1981. - v. 7. - № 4.
456. Effects of combustion and injection systems on unburnt HC and particulate emissions from a DI diesel engine // Murayama T., Miyamoto N., Chikahisa T., Yamane K. // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 1986. - P. 131-139.
457. Fenimore C.P. Development of a system for methane operation in a four cylinder light duty diesel engine. - Pittsburgh: Combustion inst, 1982. - 89 p.
458. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. - P. 2. - Pittsburgh: Combustion inst, 1971. - 102 p.
459. Few P.C., Newen H.A. Dual fuel combustion in a turbocharged diesel engine // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1987. - № 871671. - 5 p.
460. Gaasmotorenautub // *Schiff-Ing.* - 1982. - № 161. - P. 41-42.
461. Hiroyasu H., Yoshimatsu A., Arai M. Mathematical model for predicting the rate of heat release and exhaust emissions in IDI diesel engines // *Diesel Engines Passenger Cars and Light Duty Veh. Conf. London*, 5-7 Oct. 1982. - London, 1982. - P. 207-213.
462. Hoche A. Rechnerische und experimentelle Untersuchung von Elementen der Innen-Vorgänge un Dieselmotor // *KFT*. - 1988. - № 11. - S. 332-335.
463. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAE*.
464. Karim G.A., Amoozegar N. Determination of the performance of a dual fuel diesel engine with the addition of various liquid fuels to the intake charge // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1983. - № 830265. - p. 9.
465. Karim G.A., Amoozegar N. Examination of the performance of a Dual Fuel Diesel Engine with Particular Reference to the Presence of Some Inert Diluents in the Engine Intake Charge // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1982. - № 821222. - p. 8.
466. Khan J.M., Greeves G., Wang C.H. Factors affecting smoke and gaseous emissions from direct injection engines and a method of calculation // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1973. - № 730169. - 23 p.
467. Kono Seiko, Nagao Akihito, Motooka Hiroaki. Prediction of in-cylinder flow and spray formation effects on combustion in direct injection diesel engines // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1985. - № 850108. - 12 p.

468. Lavoie G.A., Heywood J.B., Keck J.C. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines // *Combustion science and technology*. - 1970. - V. 1. - № 4. - P. 313-326.
469. Lost W. Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. - Berlin, 1939.
470. Lugas G.C., Varde K.S. Off-stoichiometry operation of an si engine amodel of formation and control of nitric oxide // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1976. - № 750352. - 9 p.
471. Make P.C., Pratt D.T. The role of energy-releasing kinetics in NO formation: fuel-lean jet-stirred CO - air combustion // *Combustion science and technology*. - 1974. - V. 9. - № 5/6. - P. 221-231.
472. Matsui Y., Kamimoto T., Matsuoka S. Study on the time and space resolved measurement of flame temperature and soot concentration in a D.I. diesel engine by the two-color method // *SAE Paper*. - 1979. - № 790491. - P. 1-15.
473. Miles J.A. Power unit modification to accommodate interruptible flow of natural gas // *Trans. ASAE*. - 1977. - № 3. - P. 406-407.
474. Najt Paul M., Foster Favid E. Compression-ignited homogeneous charge combustion // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1983. - № 830264. - 16 p.
475. Natural gas will fuel bulk carter // *Mot. Ship.* - 1980. - № 725. - P. 35.
476. NKK proposes dual fuel diesel LNGC with reliquifaction // *Mot. Ship.* - 1985. - № 777. - P. 33-35.
477. Raghavendra N.M., Rao M.N. - *Indian J. Technol* 3. - 1965. - 303 p.
478. Ramsey David. Propane for diesel fuel system // *Diesel Progr. N.Amer.* - 1983. - № 3. - 27 p.
479. Silzer participation in ZNG transport systems // *Shipp. World and Ship-Build.* - 1974. - V. 167. - № 3889. - p. 144-146.
480. S.K. Liew, K.N. Bray, J.B. Moss. Comb. Flame. - 1984. - № 2. 199 p.
481. Smith O.J. Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 1981. - № 7. - P. 275-291.
482. Stehling F.C., Frazee S.D., Anderson R.C. Carbon formation from acetylene // *International Symposium on Combustion-New Haven*, 1957. - P. 247-254.
483. Thomas C. E., James B. D., Somas F. D. Mr., Kuhn I. F. Mr. // *Int. hydrogen Energy*. - 2000. ol. 25. - P. 551.
484. Vickers Jeffrey. Development of a system for methane operation in a four cylinder light duty diesel engine // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1983. - № 831197. - P. 39-45.
485. Whitehouse H.D. Advances in British dual fuel and gas engines // *Diesel Eng. andEisers Assoc.* - 1973. - № 353. - P. 1-11.
486. 6L G32X marine gas diesel developed by Fuji Diesel // *Zosen*. - 1982. - № 4. - P. 32-33.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	6
<b>1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....</b>	<b>9</b>
1.1. Проблемы влияния автомобильных двигателей на социально-экологическую обстановку .....	9
1.2. Состав отработавших газов дизелей .....	18
1.3. Проблемы и перспективы применения природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта .....	20
1.4. Существующие типы газодизелей .....	31
1.5. Особенности рабочих процессов дизельных и газодизельных двигателей с турбонаддувом .....	36
1.5.1. Основные характеристики топливopодачи, впрыскивания и распыливания топлива в КС дизеля и газодизеля .....	36
1.5.2. Особенности процессов смесеобразования, воспламенения и горения в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом .....	44
1.6. Образование оксидов азота при сгорании природного газа и дизельного топлива в дизелях с турбонаддувом .....	56
1.6.1. Образование «термических» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив .....	57
1.6.2. Образование оксидов азота из геммоксида азота в процессе горения углеводородных топлив .....	64
1.6.3. Образование «быстрых» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив .....	65
1.6.4. Образование «топливных» оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив .....	69
1.7. Физико-химические основы образования сажи в дизелях .....	71
1.7.1. Физико-химические свойства частиц сажи .....	72
1.7.2. Теория образования твердой сажистой фазы из углеводородов топлива .....	75
1.8. Модели образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля .....	86

<b>2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ .....</b>	<b>90</b>
2.1. Теоретические модели процессов смесеобразования и горения в цилиндре газодизеля с турбонаддувом .....	90
2.1.1. Зонная модель смесеобразования в цилиндре газодизеля с турбонаддувом при впрыскивании топлива в МВС через многоструйную форсунку .....	90
2.2. Уточненная математическая модель турбулентного горения МВС в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ .....	95
2.3. Теория процесса образования и выгорания частиц сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	111
2.3.1. Теория процесса образования сажи в газодизеле с турбонаддувом с впрыскиванием запального ДТ в камеру сгорания типа ЦНИДИ .....	111
2.3.2. Зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	115
2.3.3. Уточненный химизм образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	121
2.3.4. Расчетная модель для определения распределения частиц сажи по размерам в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 .....	134
2.4. Теория образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с турбонаддувом .....	140
2.4.1. Уточненный химизм процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	140
2.4.2. Статистическая модель для уточнения расчета скоростей реакций образования и расщепления оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	148
2.4.3. Уточненная зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе .....	160



<b>3. УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ</b> .....	164
3.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ .....	164
3.2. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки .....	166
3.3. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения .....	172
<b>4. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5</b> .....	176
4.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. ....	176
4.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ .....	183
4.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки .....	189
4.4. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала .....	199
<b>5. УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ</b> .....	202
5.1. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5	

в зависимости от изменения установочного УОВТ .....	202
5.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах .....	205
5.3. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения .....	209
<b>6. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ПОКАЗАТЕЛИ САЖЕСОДЕРЖАНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5</b> .....	213
6.1. Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. ....	213
6.2. Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ .....	223
6.3. Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки .....	226
6.4. Влияние применения природного газа на показатели сажесодержания и температуру в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения .....	229
<b>7. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5</b> ..	232
7.1. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ .....	232
7.2. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбо-	

наддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах .....	241
7.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения .....	248
ЛИТЕРАТУРА .....	251

Научное издание

**Лиханов В.А., Лопарев А.А.,  
Мохнаткин В.Г., Россохин А.В.,  
Рудаков Л.В., Олейник М.А.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРЕ  
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ  
НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Монография

Редактор Опшлева И.В.

Заказ № 174. Подписано к печати 05.02.2007 г.  
Объем 18 п.л. Тираж 500 экз. Бумага офсетная.

Отпечатано с оригинал-макета в типографии Вятской ГСХА.