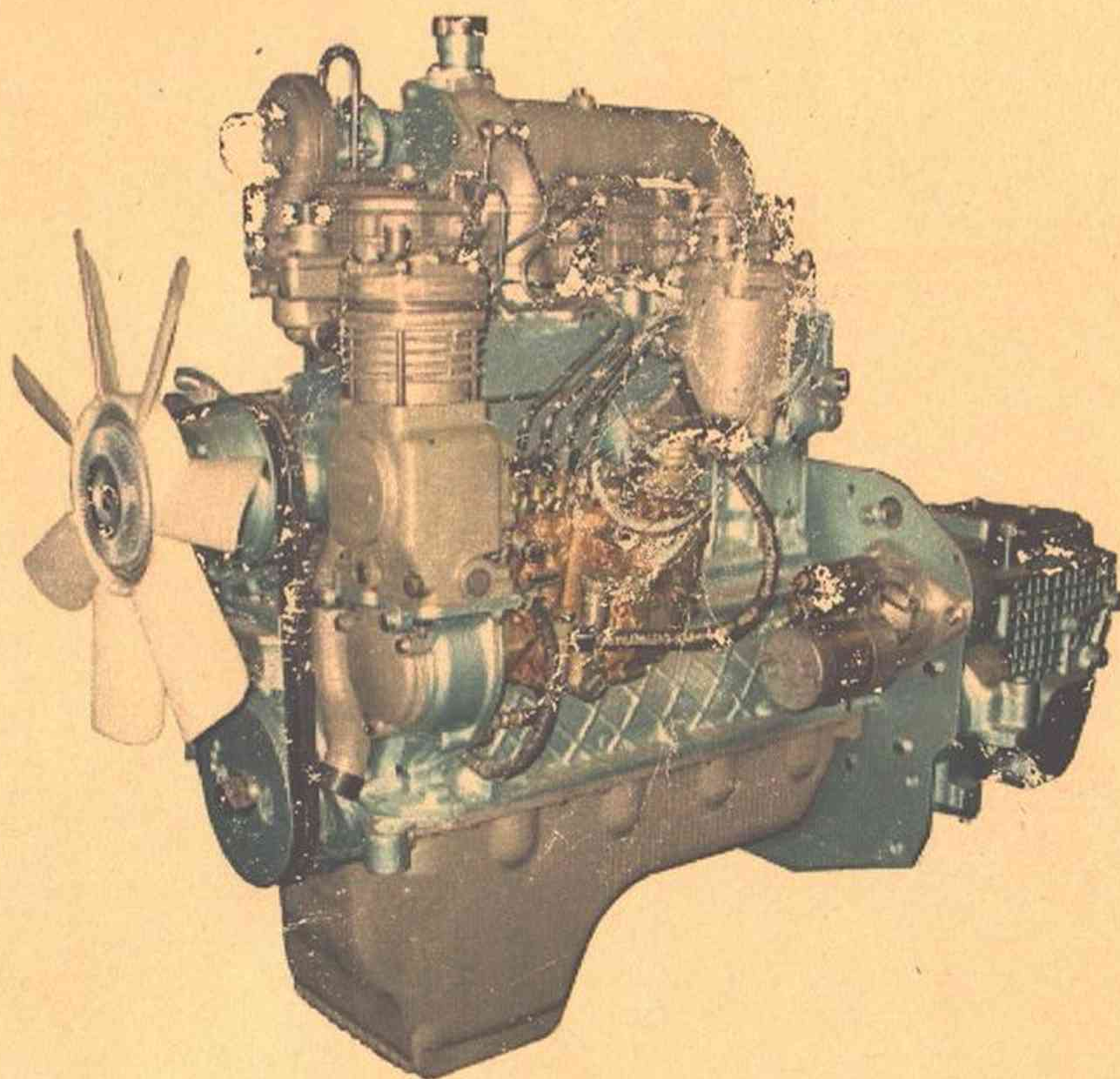


**В.А. ЛИХАНОВ, В.Г. МОХНАТКИН,
А.В. РОССОХИН**

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

Монография



Киров 2006

**В.А. ЛИХАНОВ, В.Г. МОХНАТКИН,
А.В. РОССОХИН**

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

Монография

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

Киров 2006

Лиханов В.А., Мохнаткин В.Г., Россохин А.В. Исследование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. - 124 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 общей редакцией академика Российской Академии транспорта, доктора технических наук, профессора Лиханова В.А. посвящена вопросам применения компримированного природного газа в качестве альтернативного моторного топлива, снижению токсичности и дымности отработавших газов дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.12С). Рассмотрены основные направления научных исследований по применению природного газа в дизелях и образованию токсичных компонентов в цилиндре. Особое внимание уделено вопросу образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля при работе на природном газе, его влиянию на процесс сгорания, эффективные показатели и токсичность отработавших газов.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников и аспирантов, занимающихся исследованиями в области применения компримированного природного газа в двигателях внутреннего сгорания.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. n - частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹
2. p_e - среднее эффективное давление, МПа
3. N_e - эффективная мощность дизеля, кВт
4. M_k - крутящий момент дизеля, Н·м
5. G_a - часовой расход воздуха, кг/ч
6. η_v - коэффициент наполнения
7. G_T - часовой расход топлива, кг/ч
8. α - коэффициент избытка воздуха
9. g_e - удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч
10. η_e - эффективный коэффициент полезного действия
11. t_r - температура отработавших газов, °С
12. φ - угол поворота коленчатого вала, градус
13. $\Theta_{\text{впр}}$ - установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус
14. p_z - максимальное давление сгорания в цилиндре, МПа
15. p_c - давление конца сжатия, МПа
16. $\frac{dp}{d\varphi}$ - скорость нарастания давления в цилиндре, МПа/градус
17. T - осредненная температура цикла в цилиндре, К
18. T_{max} - максимальная температура цикла в цилиндре, К
19. $G_{\text{дл}}$, G_T , $G_{\text{зап}}$ - часовые расходы дизельного топлива, запально-го дизельного топлива, кг/ч
20. G_r - часовой расход природного газа, кг/ч
21. NO_x - оксиды азота, ppm
22. CO - оксид углерода, %
23. CO_2 - диоксид углерода, %
24. CH_x , C_nH_m - суммарные углеводороды, %
25. C - сажа, ед. по шкале Bosch
26. ДТ - дизельное топливо
27. ОГ - отработавшие газы
28. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
29. УОВТ - угол опережения впрыскивания топлива
30. ПЗВ - период задержки воспламенения
31. КС - камера сгорания

32. к.п.д. - коэффициент полезного действия
33. ВМТ - верхняя мертвая точка
34. НМТ - нижняя мертвая точка
35. п.к.в. - поворот коленчатого вала
36. КПГ - компримированный природный газ
37. НТФМ - низкотемпературный фенильный механизм
38. ВТАМ - высокотемпературный ацилиновый механизм
39. С - массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля, $г/м^3$
40. S_{max} - максимальная массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля, $г/м^3$
41. $г$ - относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля, $г/кг$
42. $г_{max}$ - максимальная относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля, $г/кг$
43. N - количество частиц сажи в единице объема цилиндра дизеля, в $мм^3$
44. N_{max} - максимальное количество частиц сажи в единице объема цилиндра дизеля, в $мм^3$
45. АГНКС - автомобильная газонаполнительная компрессорная станция
46. ГБО - газобаллонное оборудование
47. ТПА - топливopодpоdpующая аппаратура
48. ПАУ - полициклические ароматические углеводороды

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день двигатели внутреннего сгорания являются самым распространенным типом энергетических установок, устанавливаемых на автомобилях и мобильной сельскохозяйственной технике. При этом отмечается постоянный рост доли дизельных двигателей из-за их большей экономичности по сравнению с бензиновыми двигателями. 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 является сажа, образующаяся при сгорании топлива в дизелях. Попадая в атмосферу, она создает ощущение загрязненности воздуха, проникает в легкие и оседает в них, вызывая различные заболевания. Поэтому задача снижения содержания сажи в ОГ дизелей является актуальной и на сегодняшний день далеко не решенной.

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

Снижения содержания сажи в ОГ дизелей можно добиться установкой в системе выпуска ОГ сажевых фильтров, которые позволяют снизить сажесодержание 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 сажесодержание в ОГ дизелей до 45 %. Но выпускаемые в настоящее время присадки имеют высокую стоимость и могут вызывать нагарообразование и повышенный износ деталей двигателя. К тому же в их состав входят токсичные компоненты.

Некоторого снижения содержания сажи в ОГ дизелей можно достигнуть путем оптимизации и совершенствования рабочего процесса дизеля и внесения серьезных конструктивных изменений. Однако это не позволит снизить содержание сажи 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. Поэтому специалисты многих стран занимаются вопросами перевода дизелей на топлива ненефтяного происхождения. Самым доступным и дешевым альтернативным топливом, по мнению специалистов, в настоящее время является сжатый природный газ, который в основном состоит из метана.

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

Углубленный анализ результатов научных исследований показывает, что зарубежными учеными и отечественными исследователями разработаны предпосылки, 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 быстроходных автотракторных дизелях рабочим объемом до 5 литров с турбонаддувом и работ, посвященных вопросам сажеобразования в дизелях при работе на природном газе. Мало работ, заканчивающихся созданием макетных образцов и проведением эксплуатационных испытаний.

Все это дает основание предполагать, что улучшение экологических показателей дизелей при работе на природном газе путем снижения 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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

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

По прогнозам Минтранса России и Минпромэнерго России 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 % [123]. 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 невозможных топливно-энергетических ресурсов [34].

По самым осторожным оценкам, величина ежегодного экологического ущерба от функционирования автотранспортного комплекса Российской Федерации оценивается в 4...5 млрд. долл. США. При сохранении существующих тенденций к 2010 г. этот ущерб увеличится ещё на 30...40 % [83].

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 % [85]. Сейчас проблему вредных выбросов автотранспорта в Западной Европе можно считать в значительной степени решенной. Форсируются также разработки, направленные на применение альтернативных источников энергии на автомобильном транспорте, и это уже ответ на более отдаленную проблему истощения 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. Самым перспективным топливом в ближайшем будущем специалисты называют природный газ, запасы которого превышают запасы нефти в несколько раз (см. рис. 1.1) [86].

Более того, дефицит нефти и нефтяных топлив ощущается уже сегодня во многих странах мира. По данным Международного энергетического агентства уровень автомобилизации, потребность 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.1.2), 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 [86].

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 [88].

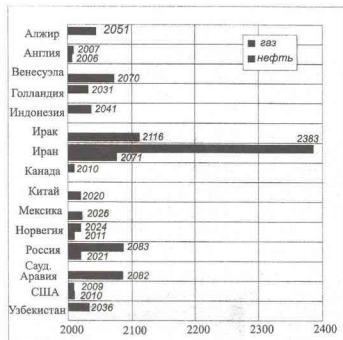


Рисунок 1.1 - Разведанные запасы нефти и природного газа на 01.01.2006 г. в отдельных странах мира

С экологической точки зрения природный газ 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 топлив, что видно из представленного рисунка 1.3 [88].

Также следует отметить отсутствие в ОГ двигателя при работе на природном газе оксидов серы SO_2 и SO_3 .

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

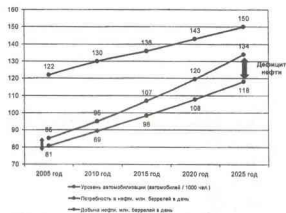


Рисунок 1.2 - Уровень автомобилизации, изменение объема добычи и потребления нефти в мире

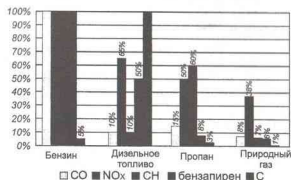


Рисунок 1.3 - Относительное содержание токсичных компонентов в отработавших газах ДВС при работе на различных топливах, % (за 100 % принят бензин, по саже 100 % - дизельное топливо)

Учитывая отмеченные преимущества КПГ перед топливами нефтяного происхождения в РФ расширяется использование КПГ на автотранспорте в качестве моторного топлива. Об этом свидетельствует рост объема реализации природного газа на АГНКС в России (см. рис. 1.4) [88].

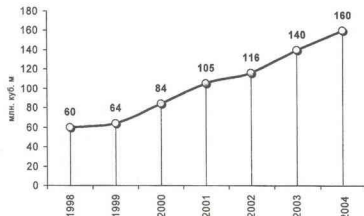


Рисунок 1.4 - Динамика реализации природного газа на АГНКС России

В 2005 г. по сравнению с 1998 г. его реализация на автомобильных АГНКС увеличилась более чем в 3 раза. 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 1.1. (данные на 01.01.2006 г.).

Таблица 1.1 - Количество автомобилей работающих на КПГ, количество АГНКС и объем реализуемого КПГ в некоторых странах

Страна	Газобаллонных автомобилей	АГНКС действующих	АГНКС строящихся	Реализация КПГ, м ³ /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

Кроме этого, КПГ является одним из самых дешевых моторных топлив на сегодняшний день. В таблице 1.2 приведены цены на КПГ в различных странах [88].

Таблица 1.2 - Цены на КПГ в различных странах

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

Стоимость дизельного топлива в России составляет на сегодня около 0,50 €/литр. Согласно Постановлению Правительства РФ № 31 от 15 января 1993 г., стоимость 1 м³ природного газа не может превышать 50 % стоимости одного литра бензина А-76, эквивалентного ему по энергонасыщенности, и составляет на 1 апреля 2006 г. 6 руб. 50 коп.

В европейских странах регулярно ужесточаются нормы экологических стандартов по уровню выбросов автомобильных двигателей (см. табл. 1.3).

Россия также присоединилась к соответствующим Европейским соглашениям.

Таблица 1.3 - Предельное содержание токсичных компонентов в ОГ ДВС

Нормы	Год введения	СО, г/кВт·ч	НС, г/кВт·ч	NO _x , г/кВт·ч	Твердые частицы, г/кВт·ч	Дымность, м ⁻¹
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» [114].

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

Согласно «Концепции развития автомобильной промышленности России на 2005...2008 гг.», с 01 января 2006 г. 100 % выпускаемой техники должно соответствовать нормам Евро-2, а с 01 января 2008 г. – Евро-3.

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 объёмов пассажирских и грузовых перевозок доля автомобильного транспорта в загрязнении окружающей среды будет только увеличиваться. Потери от такого положения дел составляют 7...9 % ВВП.

В России вопросу перевода автотранспорта на альтернативные топлива в последнее время уделяется значительное внимание. ОАО «Газпром» вместе с Правительством РФ разработало 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 порядка 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, междугородные 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 показатель 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 заправок 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 отработавшими газами в 2015 году снизятся на 750...850 тыс. тонн, в 2020 году на 1...1,2 млн. тонн.

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

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 тысяч 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 КПП 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 газ возникают определенные трудности, для решения которых требуются дополнительные исследования в этой области.

Так, одним из способов перевода дизелей автомобилей для работы на КПП 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, в случае отсутствия газа двигатель может снова работать по дизельному процессу, что 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. Отмеченные преимущества газодизелей обеспечивают возможность достаточно широкого их использования в различных областях народного хозяйства Российской Федерации.

1.2. Существующие типы газодизелей

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

В настоящее время на ОАО «ЛАЗ» (Украина) 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 [104].

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. [140].

За рубежом разработкой и производством газодизелей большой мощности в разное время занимались фирмы «Зульцер»,

«Делаваль-Энтерпрайз», «Мирлесс», «Пилстик», «Инглиш-электрик», «МWM», «Иенбахер» [138].

Автомобильной промышленностью 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. Порция запального дизельного топлива на всех режимах остается неизменной и составляет 20 % от общего расхода топлива. На режиме холостого хода двигателя работают только на дизельном топливе [69, 57].

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 нерегулируемом поступлении воздуха. Проведены экспериментальные исследования указанного дизеля [70].

В Кировском СХИ 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 компримированном природном газе (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 [96].

Большое внимание уделяется работам по разработке газодизельных модификаций дизелей в НАМИ. Совместно с НИЦИ-АМТом в 2002 г. на газодизельный цикл переведен дизель самосвала Татра-815С2 с непосредственным впрыскиванием «Татра Т-3-929» рабочим объемом 15,8 л, степенью сжатия 16,5. Расход топлива газодизеля составил: ДТ – 16 л/100 км, газ – 24,5 м³/100 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 %.

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 3,455 л, степенью сжатия 17,5 и углом опережения впрыскивания топлива 19° п.к.в.

На базе дизеля РАБА Д2156НМ6И (Венгрия) рабочим объемом 10,35 л, степенью сжатия 17,0 и пленочным смесообразованием разработана газодизельная модификация, прошедшая успешные испытания на двух автобусах – сочлененном «Икарус-280» и обычном «Икарус-260».

Компания IVECO предлагает для лёгких грузовиков Daily S двигатель, работающий на компримированном природном газе. 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 объёмом 2,8 литра и мощностью 106 л.с. По утверждению компании автомобиль выполняет нормы Евро-5.

1.3. Состав отработавших газов дизелей

ОГ дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Среди них можно выделить азот N₂ и кислород O₂, продукты полного сгорания топлива (CO₂ и H₂O), вещества, образующиеся в результате термического синтеза из воздуха при высоких температурах (оксиды азота NO_x), продукты неполного сгорания топлива (CO, CH_x, дисперсные твердые частицы, основным компонентом которых является сажа), а также оксиды серы, альдегиды, продукты конденсации и полимеризации [99]. Нормируемыми токсичными компонентами ОГ дизелей в соответствии с современными нормативными документами (нормы ЕВРО) яв-

ляются NO_x , CO , CH_x , твердые частицы и дымность [114].

Одним из наиболее токсичных составляющих ОГ дизелей является сажа, относительная агрессивность которой принимает-ся порядком двухсот [63].

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 $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, являющегося индикатором присутствия в ОГ других ПАУ [114]. Доля бенз(а)пирена в суммарном выбросе ПАУ составляет у дизелей до 3,7 % [114]. 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 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.

1.4. 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 сажеобразования 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. Смэйлиса, С.А. Батурина, В.Г. Кнорре, М.В. Страдомского, В.В. Померанцева, У. Гардинера, Т. Танзавы, В. Хайнеса, Ф.Г. Бакирова, В.А. Лиханова, А.С. Лоскутова, А.Л. Новоселова, В.А. Звонова, 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. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, Н.В. Лаврова, О.И. Смита и др. [187, 188, 110, 29, 71, 160, 10, 12, 96, 97, 141].

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

Основная причина интенсивного сажевыделения при диффузионном сгорании неоднородной смеси в камере сгорания 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 сажистых частиц по индивидуальным химико-физическим механизмам. Концентрация сажи в цилиндре двигателя к моменту открытия выпускных клапанов однозначно определяет дымность ОГ (в предположении, что в выпускном трубопроводе выгорание сажи не происходит) [102].

1.4.1. Физико-химические свойства частиц сажи

Изучением физико-химических свойств сажи в разное время занимались многие исследователи [4, 95, 126, 129, 164, 178, 179, 184, 186, 198].

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 [86] на основании рентгеноструктурных исследований было введено представление о турбоэбратной 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 $2,0 \dots 3,0$ нм. Высота слоев порядка $1,2 \dots 2,0$ нм. Р. Франклин [203], изучая рост кристаллитов графитирующихся и неграфитирующихся углеродов, указала на то, что углеродные слои кристаллитов соединены между собой поперечными связями, препятствующими их упорядочению в графитовую структуру при гомогенной графитизации. Касаточкиным [76] 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. Франклин [203] и Касаточкиным [76]. Сажевые кристаллиты являются зародышами сажи. Первичные сажевые частицы связаны между собой микрофибриллами.

Гомфани и Вильм [132] нашли, что кристаллиты имеют высоту $1,3$ нм и среднюю длину $2,1$ нм.

Рентгеноструктурными исследованиями и с помощью электронных микроскопов с высокой разрешающей способностью установлена внутренняя структура частиц сажи. Сажевая частица состоит из отдельных сажевых зародышей, называемых кристаллитами. Размер сажевой частицы составляет $10 \dots 30$ нм. Из данных по дифракции рентгеновских лучей следует, что каждая частица содержит $10^3 \dots 10^4$ кристаллитов. Наименьший размер кристаллита равен $1,3 \times 2,1$ нм и он содержит $120 \dots 200$ 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 [184].

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 $0,345 \dots 0,370$ нм. Два близлежащих слоя образуют пластинку сажи. Кристаллит содержит $3 \dots 5$ пластинок, состоящих из 44 атомов углерода [98].

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.

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 режима горения и находится в пределах $60 \dots 120$ м²/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 [82].

Химический состав частиц сажи. Частицы сажи состоят из $92 \dots 95$ % 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 $(1,8 \dots 2,0)$ г/см³. Содержание водорода в сажевых частицах тоже может меняться и определяется атомным отношением C/H. Величина этого отношения изменяется от 3 до 15.

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

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 [183].

Влияние сажи на радиационное излучение пламени. В камере сгорания дизеля при сжигании углеводородных топлив образуется светящееся пламя, эмиссионные свойства которого определяют интенсивность лучистого теплообмена со стенками КС. Радиационная способность такого пламени кроме температуры зависит от концентрации сажистых 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 сажистых частиц в объеме пламени. При этом средний уровень концентрации сажистых частиц в объеме пламени зависит не только от α , но и от рода сжигаемого топлива [170, 171, 177].

1.4.2. Теория образования твердой сажистой фазы из углеводородов топлива

Теория пиролиза углеводородов. Дэви, а затем Марченд и Бергто [86] 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 (линия при 247,8 нм). Можно предположить, что вначале происходит полная дегидрогенизация углеводородов с образованием C , C_2 , C_3 и т. д., в след за которой происходит укрупнение этих частиц. Смит в 1940 г. высказывал 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 [164].

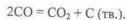
Образование углерода из полициклических ароматических углеводородов. Руммель и Вэ в 1941 г. предположили, что образованию углерода предшествует образование полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Размеры бензольного кольца почти такие же, как и расстояния между атомами в графитовой плоскости, 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 [86]. 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 Гейдоном в работах [29, 30]. 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 достаточном 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 графит-

тизироваться, 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 [75] показывают, что первый механизм маловероятен. Авторы работы [76] отвергают оба механизма на основании величины энергетического барьера и по другим соображениям. В работе [73] 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 СО. Беренс [73] полагает, что укрупнение зародышей и рост частиц углерода может происходить в соответствии с реакцией Будаура:



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 [18].

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 $T < 1000 \text{ K}$), либо в результате разрушения ароматических колец образовывать ацетилен C_2H_2 и радикалы C_2 , C_2H (при $T = 1000 \dots 1500 \text{ K}$). Границей между этими областями является предельная температура стабильности бензольного кольца ароматических углеводородов. Экспериментально установлено, что при температурах меньше 1000 K после отрыва от ядра алкильных групп фенильные радикалы C_6H_5 и бензольные кольца не разрываются, а кон-

денсируются в полициклические соединения типа ди- и трифенила, а при $T > 1000 \text{ K}$ 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 будут разложиться до ацетилена.

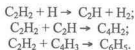
При повышенных температурах (до 1300 K) может происходить дегидрогенизация ацетилена с образованием радикалов C_2 и C_2H . Взаимодействие ацетилена с полученными радикалами может приводить к образованию зародышей сажевых частиц. Переход углерода из газовой фазы в твердую за счет образования новых связей 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: агломератов, агрегатов, цепочечных 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 [36] и Р.З. Магарилы [51] 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 очередь, 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 [113].

Для условий сгорания в дизелях НГФМ 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 [190] 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 сопро-

вождается. 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 [48].

Основная идея ацетиленовой теории заключается в том, в высокотемпературном пламени большая часть углеводородов сначала превращается в ацетилен, который в результате дегидрогенизации 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 [6].

Процесс образования зародышей при термическом разложении углеводородов имеет более высокую энергию активации (100 ккал/моль) [189], чем процесс роста сажевых частиц (78 ккал/моль). Этот факт находится в соответствии с двухстадийным механизмом образования сажи.

Теснером и Рафалькес [54] 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 исследований 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

камере сгорания газодизеля, мы считаем, что определяющим массовый выход сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом является ВТАМ. Аргументами, на наш взгляд, в пользу этой гипотезы служат следующие экспериментальные факты [117].

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 капле 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 времени процесса сгорания в газодизеле и составляет 10^{-7} с.

2. Максимальная температура пламени в цилиндре газодизеля (2500 К) значительно выше определяющей температуры низкотемпературного фенильного 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.

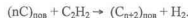
4. Форма, размеры, структура, химический состав и физические свойства дизельной сажи во многом совпадают с аналогичными показателями технологической ацетиленовой сажи [189].

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

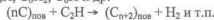
При температурах менее 1000 К первичные частицы образуются из ядер высокомолекулярных и ароматических структур, конденсирующихся из жидкой фазы в первичные твердые частицы при достижении критических физических свойств. При низких температурах скорости реакций полимеризации превышают скорость процессов дегидрогенизации, что приводит к образованию высокомолекулярных структур, при дальнейшей дегидрогенизации которых происходит фазовый переход с образованием твердых частиц. Повышение температуры (до 1500 К) ведет к

увеличению относительной скорости процесса дегидрогенизации, 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) высокомолекулярные 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 реакций 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. 1.4. [171].

Таблица 1.4 - Кинетические константы образования пироуглерода из индивидуальных углеводородов $K = A \cdot \exp^{(-E/RT)}$

Углеводород	T, °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	$4,0 \cdot 10^{-7}$	151,0
Бутадиен	475-600	$7,5 \cdot 10^{-7}$	142,0
Бензол	750-870	$3,0 \cdot 10^{-3}$	230,0
Толуол	650-850	$9,9 \cdot 10^{-2}$	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 дизеля [127].

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 впрыскивается 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 дымности ОГ дизелей является значение коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1,3$, которое называют пределом дымления. Диапазон α , в котором происходит наиболее интенсивное образование сажи, составляет 0,33...0,7 [98]. 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 [83]. При более высоких температурах скорость окисления сажи начинает превышать скорость ее образования и количество сажи в ОГ уменьшается. При температурах более 2400 К концентрация сажи в КС очень незначительна [178]. 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 [96]: ряд нафталина – бензолный ряд – диолефины и дициклические нафтены – олефины и моноциклические нафтены – 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 [96].

Влияние турбонаддува. Применение турбонаддува в дизелях позволяет увеличить плотность воздуха, поступающего в цилиндры, и тем самым повысить содержание кислорода в КС. Это приводит к увеличению коэффициента избытка воздуха α и, сле-

довательно, интенсификации процесса выгорания сажевых частиц. Кроме этого, турбонаддув 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. Турбулентность, создаваемая в процессе сгорания, приводит к повышению эффективности сгорания, увеличивая при этом использование кислорода [6]. Эти факторы способствуют снижению сажеосодержания в ОГ дизелей.

1.5. Модели образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля

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

Существует несколько моделей образования сажи в цилиндрах дизелей. В разное время закономерностями процесса образования сажи занимались Разлейцев Н.Ф., Суровкин В.Ф., Гилязетдинов Л.П., Батурина С.А., Кнорре В.Г. и другие ученые. Одним из путей рассмотрения этого сложного и нестационарного процесса является применение зонной модели образования и выгорания сажи, согласно которой 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 способ нашел широкое развитие и применение в МГТУ им. Н.Э. Баумана, где на его основе проводят математическое моделирование процессов горения и образования токсичных компонентов в цилиндрах ДВС. Однако крайне мало работ, посвященных вопросу образования и выгорания сажи в газодизелях.

Профессором Лихановым В.А. была предложена зональная модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля 4С 11,0/12,5 (Д-240) [96]. В этой модели при впрыскивании запыльной порции ДТ в метановоздушную среду в КС выделяется

5 зон, которые оказывают наибольшее влияние на результирующее сажевыделение газодизеля (см. рис. 1.5).

Первая зона (рис. 1.5) представляет собой ядро топливного факела, характеризуемое избытком углеводородного горючего и недостатком окислителя с температурным уровнем менее 1500 К. Здесь происходит генерация сажевых частиц по низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ).

Вторая зона (зона 2, рис. 1.5) 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 химическими зародышами являются полиацетилены.

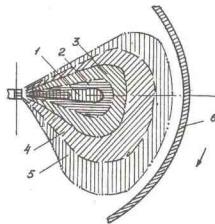


Рисунок 1.5 - Феноменологическая (зональная) модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля: 1 – зона образования сажи по НТФМ; 2 – зона образования сажи по ВТАМ; 3 – зона генерации сажи с недостатком окислителя в МВС; 4 – зона генерации сажи с избытком окислителя в МВС; 5 – зона догорания обедненной МВС; 6 – стенка цилиндра.

Третья зона (зона 3, рис. 1.5) 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 ре-

акции термического и окислительного пиролиза молекулы CH_4 и ее радикалов с последующим образованием на последней стадии процесса атомов свободного углерода и его комплексов.

Четвертая зона (зона 4, рис. 1.5) отличается от третьей избытком окислителя. В этой зоне достигается наиболее высокая температура. В таких условиях преобладающими являются реакции окисления CH_4 , определяющие тепловой режим в цилиндре газодизеля. Одновременно взаимодействие с кислородом атомов углерода и его комплексов приводит к их разрушению с образованием диоксида углерода.

Пятая зона (зона 5, рис. 1.5) представляет собой зону догорания обедненной МВС (срыва бедного пламени), в которой завершаются все химические реакции и устанавливается равновесная концентрация продуктов полного горения [96].

2. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫГОРАНИЯ ЧАСТИЦ САЖИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА КПГ

2.1. Теория процесса образования сажи в газодизеле с турбонадувом с впрыскиванием запального дизельного топлива в камеру сгорания типа ЦНИДИ

Для определения количества образующейся при сгорании топлива сажи пользуются понятиями массовая концентрация C сажи, относительная концентрация γ сажи и количество частиц N сажи в единице объема в цилиндре дизеля.

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

$$C = \gamma/M,$$

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

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

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

где I_0 и I_e – интенсивности луча начальная и после его прохождения через цилиндр.

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

Для оценки изменения сажесодержания, вызванного только объемным процессом сажевыделения, необходимо исключить влияние переменного объема цилиндра на результирующую концентрацию сажи. При известных концентрациях C и γ массовое сажесодержание в цилиндре в некоторый момент времени, которое соответствует объем цилиндра V_t , определится как

$$rV_i = MC V_i$$

Выбирая в качестве объема приведения некоторый единственный объем V_0 , получим

$$r = MN,$$

где $r = \bar{C}(V_i/V_0)$ - относительное сажесодержание в цилиндре при условно постоянном объеме $V_{и} = V_0$;

$r = C(V_i/V_0)$ - абсолютное сажесодержание в цилиндре при условно постоянном объеме $V_{и} = V_0$.

Для графиков $C = f(\varphi)$ и $r = f(\varphi)$ характерно непрерывное увеличение концентрации до максимального значения и последующее снижение до значений, определяющих дымность ОГ. Каждому характерному участку кривых $C, r = f(\varphi)$ 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} , сажесодержания k на начале выпуска $C_{\text{вып}}$ и скорости массового выгорания сажи от C_{\max} до $C_{\text{вып}}$. С точки зрения конечных результатов процесса сажевыделения концентрация $C_{\text{вып}}$ 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. Причем временной фактор играет определяющую роль в снижении дымности ОГ дизелей, значительно различающихся по степени быстротходности. В несколько раз больше располагаемое время выгорания сажи в цилиндре среднеоборотного дизеля по сравнению с быстроходным обеспечивает выгорание более 80 % образовавшейся сажи и практически бездымный выхлоп. В быстроходных дизелях по оценке ряда исследователей к началу выпуска успевают выгореть только 50...65 % от C_{\max} [6].

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 сажистых частиц в цилиндре достигает максимального значения почти одновременно с максимальной скоростью тепловыделения на участке диффузионного сгорания $(dx/d\varphi)_{\max II}$. 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 характеризующаяся значениями C_{\max} и $C_{\text{вып}}$ также связана с характеристикой тепловыделения в цикле. Зависимости

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

и

$$C_{\text{вып}} = f(dx/d\varphi)_{\max II}$$

имеют линейный характер.

Существенное снижение дымности выпуска и концентрации сажи в течение всего цикла получается при увеличении $(dx/d\varphi)_{\max I}$ и одновременном снижении скорости $(dx/d\varphi)_{\max II}$, т.е. увеличении количества топлива, сгорающего в первой фазе видимого сгорания, и уменьшении количества топлива, сгорающего в диффузионной фазе. 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 сум-

марном 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 преимущественного образования сажи. Начало сажевыделения совпадает с началом активного тепловыделения, конец участка I определяется характерным провалом на кривой $d\dot{N}/d\varphi$, который соответствует моменту достижения максимального давления в цилиндре p_{\max} .

Сравнивая первую фазу сажевыделения с динамикой тепловыделения, видно, что она полностью включает в себя участок I активного тепловыделения, связанный с быстрым сгоранием гомогенной смеси, подготовленной за период задержки воспламенения. 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 участке I 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 саже соответствует второй максимум скорости сажевыделения $(d\dot{N}/d\varphi)_{\max II}$, положение которого по времени отстает от $(d\dot{N}/d\varphi)_{\max I}$. В этот момент в цилиндре идет процесс раз-

витого диффузионного горения основной части топлива. Диффузионным пламенем охвачена большая часть объема, а температура газов достигает максимального значения. Процессы образования и выгорания сажи идут с соизмеримыми скоростями, но количественный массовый выход сажи превосходит количество выгорающей сажи, и скорость результирующего процесса остается положительной, обуславливая рост сажесодержания до его максимального значения.

Участок III – фаза преимущественного выгорания сажи, длящаяся до полного открытия выпускных клапанов. Этой фазе соответствует третий максимум скорости сажевыделения $(d\dot{N}/d\varphi)_{\max III}$, принимающий отрицательные значения, так как она характеризует уменьшение сажесодержания в цилиндре. Процесс сгорания к этому времени закончился, и возможно 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 желательное смещение максимума сажевыделения в сторону в.м.т. и интенсивная турбулизация заряда в конце второй и в третьей фазах сажевыделения (но не раньше) во избежание отрицательного «эффекта перезавихривания» в начале сгорания.

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

Предполагаемая структура факела топлива, впрыснутого через отверстие распылителя в метановоздушную смесь (МВС), представлена на рис. 2.1. В объеме факела имеется значительная неоднородность как в продольном, так и в поперечном направлении, позволяющая выделить ряд зон, отличающихся по температуре и концентрации реагирующих веществ. Основная причина

интенсивного сажевыделения при диффузионном сгорании 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 камере сгорания (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 α и значительным обеднением смеси, в цилиндре всегда имеются зоны, в которых соотношение углерода 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 дизельного топлива (см. рис. 2.1) с высокой плотностью распределения частиц (расстояние между частицами капель порядка диаметра капель), относительно низкой температурой (< 1500 К) и малым локальным коэффициентом избытка воздуха α . Ядро обеспечивает перенос массы топлива вглубь КС, где сосредоточена основная масса воздуха. В процессе выгорания топливо в ядре 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 носика распылителя, создаются благоприятные условия для образования частиц сажи по низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ), но скорость процесса сажеобразования невелика.

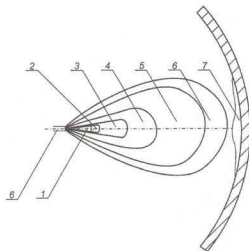


Рисунок 2.1 - Зонная модель топливного факела быстроходного дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе
 1 – ядро топливного факела; 2 – уплотненный передний фронт; 3 – зона образования сажи из метана при недостатке окислителя; 4 – зона образования сажи с избытком окислителя в МВС; 5 – зона выгорания сажи в обедненной МВС; 6 – зона выгорания сажи в бедной смеси; 7 – пристеночный слой топлива; 8 – распылитель

При НТФМ химическим зародышем сажевой частицы является фенильный радикал C_6H_5 или бензильный радикал $C_6H_5CH_2$, 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 (см. рис. 2.1). 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 α , 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 рассредоточиваются 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 CH_4 и его радикалов CH_3 , CH_2 , 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 H и радикалами 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 ($> 1500 \text{ K}$) и недостатком кислорода в МВС. В этой зоне происходит образование частиц сажи за счет дегидрогенизации (отщепления атомов водорода) молекулы метана 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 метановоздушную смесь с избытком окислителя. Капли топлива попадают в нее из второй и третьей зон факела путем рассеивания фронта, а также отрыва капель от боковой поверхности осевой струи. Преобладающими являются реакции окисления CH_4 , определяющие тепловой режим в цилиндре газодизеля. Для этой зоны характерны наиболь-

шая 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, характеризуемого высоким коэффициентом избытка воздуха α .

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 больший 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 4ЧН 11,0/12,5 имеет КС типа ЦНИДИ, в которой обеспечивается объемно-плечное смесеобразование. 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 переобогащенный 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 капель топлива и газа турбулентное, то есть кроме потока газа, увлекаемого вдоль оси факела, имеется вихревое и поперечное движение газа и жидкости. Это способствует выравниванию концентраций топлива в объеме факела и делает границы между зонами достаточно неус-

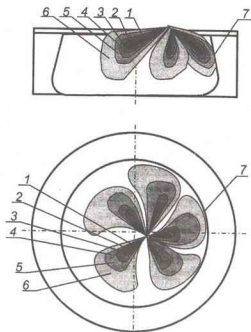


Рисунок 2.2 - Зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе (обозначения см. на рис. 2.1)

тойчивыми, 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 4ЧН 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 происходит выгорание сажевых частиц, так как газодизель работает на бедных смесях даже на режимах высоких нагрузок. Этим можно

объяснить низкий уровень результирующего сажеобразования дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе.

На рис. 2.2 представлена зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при впрыскивании запальной порции дизельного топлива.

Образовавшиеся факелы по мере развития в камере сгорания образуют указанные зоны, а также могут взаимодействовать между собой.

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

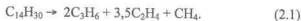
Уточненный химизм образования сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе можно представить в следующем виде (рис. 2.3).

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, и высокотемпературный ацетиленовый механизм, преобладающий при более высоких температурах.

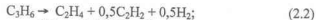
При попадании в камеру сгорания углеводороды топлива, подвергаясь термическому воздействию в цилиндре двигателя, разлагаются с образованием активных радикалов и ацетилена. Причем при температурах менее 1500 К происходит образование фенильного C_6H_5 и бензильного C_6H_7 радикалов через ацетилен (цепи 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 (см. рис. 2.3). При этом молекула метана подвергается дегидрогенизации с образованием радикалов CH_3 , CH_2 , CH и об-

разованием атомарного углерода С. Эти радикалы при взаимодействии с ацетиленом и радикалом C_2H образуют химические зародыши сажевых частиц, которые в процессе поверхностного роста образуют минимальную сажистую частицу – физический зародыш. В результате процессов коагуляции происходит укрупнение частиц и образуются первичные сажевые частицы. При столкновениях и взаимодействиях сажевых частиц образуются более крупные вторичные цепочечные 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 окисляющие 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 :



или C_2H образуется в результате соударения двух молекул

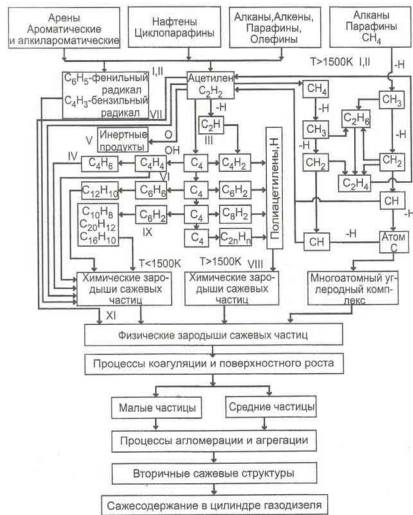
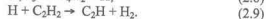


Рисунок 2.3 - Уточненный химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

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 :

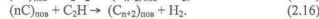
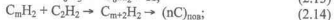
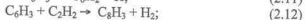
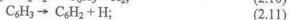


дают продолжение цепей образования исходных активных частиц C_2H , H и приводят к появлению бирадикала диацетилена C_4H_2 . Источником ионов H является также реакция диссоциации водорода, который всегда присутствует в углеводородных пламенах.

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 (2.9). На преобладающую роль этой реакции в генерировании радикалов C_2H перед реакциями термического распада ацетилена и бимолекулярного механизма указано в работе А.В. Крестинина.

Согласно общепринятой и экспериментально подтвержденной схеме образования сажи, сформулированной и развитой в работах научной школы П.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 бутадиев 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 [96]:



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 успевает пройти все стадии процесса и осажается на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи.

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

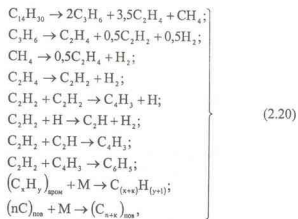
Процесс коагуляции первичных частиц идет параллельно с процессом поверхностного роста и оказывает существенное влияние на формирование формы и структуры частиц сажи. Процесс коагуляции зависит от степени турбулентности заряда в КС газодизеля. В зависимости от размеров частиц и физических условий процесса он может протекать в кинетическом или диффузионном режиме. По мере роста размеров частиц их радикальные свойства и концентрация снижаются. На основании анализа работ [97, 99, 129, 130, 185, 189, 195] можно сделать вывод, что наибо-

лее вероятный размер сажистых 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 НТФМ, при котором химическим зародышем сажевой частицы является углеродный радикал C_6H_5 – фенил.

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



где М – молекула углеводорода или углеводородный радикал.

Константы скоростей реакций образования сажи находятся из выражения

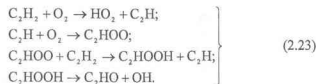
$$k_i = A \cdot 10^m \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad i = 1 \dots 5, \quad (2.21)$$

а константы скоростей реакций газификации сажи вычисляются через координаты полуса В.В. Померанцева [123] $k^* = 8.5 \text{ м/с}$ и $T^* = 2500 \text{ К}$ в соответствии с выражением

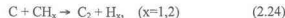
$$k_i = k^* \exp\left[\frac{E_i}{RT} \left(1 - \frac{T}{T^*}\right)\right], \quad i = 6 \dots 10. \quad (2.22)$$

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 [76]:



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

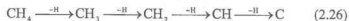


в зоне пиролиза ацетилена, указывает на образование в пиролизной зоне также радикалов CH_2 , CH и C , являющихся предшественниками возбужденных радикалов C_2 . Образование радикалов CH_2 , CH , C и других может иметь место в предпламенной зоне в реакциях ацетилена или продуктов его разложения с радикалами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

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



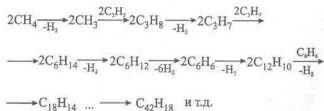
Наиболее простым путем термического разложения метана может быть ряд последовательных стадий дегидрирования:



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



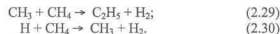
Очевидно, что эндотермические процессы дегидрирования должны параллельно сопровождаться какими-то экзотермическими реакциями, по-видимому, ассоциацией атомов водорода и углеводородных радикалов. Затраты энергии на образование углеводородных радикалов непрерывно снижаются с укрупнением последних. Исходя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



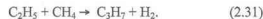
Рост углеродной цепи промежуточных радикалов следует рассматривать как радикально-цепной процесс, первой стадией которого является термическое инициирование по реакции:



Далее оба радикала могут взаимодействовать с молекулой метана:



В результате реакции (2.29) происходит рост длины углеродной цепи, этот процесс продолжается и дальше:



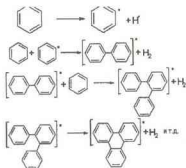
При взаимодействии углеводородного радикала с молекулой углеводорода преимущественно образуется новый, более тяжелый (а потому и более устойчивый) углеводородный радикал. Можно было бы ожидать образования атома водорода и углеводородной молекулы, например



но 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 оттесняют 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 сажистых частиц идет их частичное выгорание. В общем случае горение углерода – сложный многостадийный нестационарный гетерогенный 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, неизомеричностью и неизохоричностью некоторых реакций. 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 гетерогенный 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, неизомеричностью и неизохоричностью некоторых реакций.

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 га-

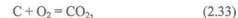
зового реагента. Кроме этого, можно учесть подвод вещества к поверхности частицы за счет диффузии. Также можно предположить, что взаимодействие углерода с кислородом происходит не только на внешней поверхности частицы, но и в объеме, то есть необходимо учитывать подвод вещества к внутренней поверхности частицы.

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

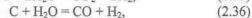
- 1) подвод газообразных компонентов к поверхности частицы (внешней и внутренней);
- 2) адсорбция газообразных компонентов поверхностью частицы;
- 3) реакция на поверхности частицы;
- 4) десорбция продуктов реакции;
- 5) отвод продуктов реакции от поверхности частицы (внешней и внутренней).

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 двуокисью 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 двуокисью 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 температу-

ры, 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 ($U=0,03...0,38$ м/с) скорость выгорания углерода однозначна величине U_p . Скорость изменения поверхности сферической сажевой частицы представлена выражением

$$-\frac{dS}{dt} = K = K_0 (U_p)^{0.4} + K', \quad (2.38)$$

где U – линейная скорость потока;

p – давление;

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

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

Из уравнения (2.48) вытекает, что скорость выгорания углеродной частицы зависит от давления и линейной скорости потока и что для покоящегося газа эффект давления равен нулю.

2.4. 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 неравновесности, 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 механизм 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.

На основании рассмотренных работ, однако, 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 сажистого углерода по размерам на спектральные эффективные сечения поглощения и рассеяния в ЦКТИ были проведены исследования фракционного состава частиц сажистого углерода в пламени легкого жидкого топлива при различных условиях горения.

Анализ многочисленных кривых распределения частиц сажи по размерам показал, что все они удовлетворительно описываются зависимостью, аналогичной Максвелловскому распределению молекул газа по скоростям в условиях теплового равновесия. Обозначая $N(x)$ распределение плотности вероятности, характеризующее дисперсный состав частиц сажистого углерода, можем написать

$$N(x) = Ax^2 e^{-bx^2}. \quad (2.39)$$

Зависимость (1) 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_m зависимостью

$$b = 1/x_m^2. \quad (2.40)$$

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

$$\int_0^{\infty} N(x) dx = A \int_0^{\infty} x^2 e^{-bx^2} dx = 1. \quad (2.41)$$

Так как

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

то, принимая во внимание (2.40), найдем

$$A = \frac{4}{\sqrt{\pi} x_m^3}. \quad (2.42)$$

Тогда

$$N(x) dx = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{x_m} \right)^2 e^{-\left(x/x_m\right)^2} d\left(\frac{x}{x_m} \right). \quad (2.43)$$

Обозначая

$$\sum \left(\frac{x}{x_m} \right) = \sum (z) = z^2 e^{-z^2}, \quad (2.44)$$

получаем

$$N(x) = \frac{4}{\sqrt{\pi} x_m} \sum (z). \quad (2.45)$$

Проведенные расчеты показали, что функция (2.39) хорошо описывает имеющиеся опытные данные о распределении частиц сажистого углерода по размерам.

Характерная особенность функции (2.45) 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 $\sum(z)$.

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

координатах зависимостью

$$\tilde{N}\left(\frac{x}{x_m}\right) = \frac{N(x)}{N(x_m)} = \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 e^{-[(x/x_m)^2 - 1]}. \quad (2.46)$$

Для описания кривой распределения сажистых частиц по размерам Сато и Кунитомо воспользовались формулой Розина-Рамлера с двумя определяющими параметрами. В работах Росслера 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 (2.46), не сложно определить любую осредненную характеристику спектра размеров частиц сажистого углерода в пламени как математическое ожидание определенных средних величин.

Средний размер частиц

$$\bar{x}_1 = \int_0^{\infty} xN(x)dx = \frac{4x_m}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} z \sum(z) dz, \quad (2.47)$$

отсюда

$$\frac{\bar{x}_1}{x_m} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}. \quad (2.48)$$

Средний квадратичный размер частиц (математическое ожидание квадрата средней величины)

$$\bar{x}_2 = \int_0^{\infty} x^2 N(x) dx = \frac{4x_m^2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} z^2 \sum(z) dz, \quad (2.49)$$

Отсюда

$$\frac{\bar{x}_2}{x_m} = \sqrt{3/2}. \quad (2.50)$$

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

В соответствии с приведенным выше определением понятия величины x_n можно написать

$$\int_0^{x_n} N(x) dx = \frac{1}{2} \quad \text{или} \quad \int_0^{z_n} \sum(z) dz = \frac{\sqrt{\pi}}{8}, \quad (2.51)$$

где

$$z_n = \frac{x_n}{x_m}.$$

Интегрируя выражение (2.51) по частям, получаем

$$2\text{erf}(z_n) - \frac{4}{\sqrt{\pi}} z_n e^{-z_n^2} = 1 \quad (2.52)$$

или

$$\frac{x_n}{x_m} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\sum\left(\frac{x_n}{x_m}\right)}{2\text{erf}\left(\frac{x_n}{x_m}\right) - 1}, \quad (2.53)$$

Можно показать, что для всех распределений частиц по размерам величина

$$\frac{\sum\left(\frac{x_n}{x_m}\right)}{2\text{erf}\left(\frac{x_n}{x_m}\right) - 1} \approx 0,48,$$

следовательно,

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

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

$$\frac{4}{\sqrt{\pi}x_m^3} \left(2x \cdot e^{-\left(\frac{x}{x_m}\right)^2} - x^2 \cdot 2 \frac{x}{x_m^2} \cdot e^{-\left(\frac{x}{x_m}\right)^2} \right) = 0, \quad (2.54)$$

$$\frac{8}{\sqrt{\pi}x_m^3} \left[-\frac{2x}{x_m^2} e^{-\frac{x^2}{x_m^2}} \left(x - \frac{x^3}{x_m^2} \right) + e^{-\frac{x^2}{x_m^2}} \left(1 - \frac{3x^2}{x_m^2} \right) \right] = 0, \quad (2.55)$$

$$N(x_m) = \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot x_m^3} \cdot x_m^2 e^{-1} = \frac{4}{e\sqrt{\pi}x_m}. \quad (2.56)$$

Решив полученные уравнения и подставив значения возможных размеров сажевых частиц в выражение (2.45), по полученным расчетным значениям строим график распределения плотности вероятности $N(x)$.

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

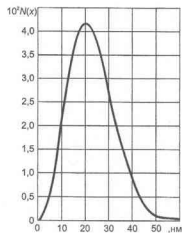


Рисунок 2.4 - Распределение плотности вероятности $N(x)$ размеров частиц сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

3. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

Компримированный природный газ на сегодняшний день является самым дешевым и доступным топливом нефтяного происхождения для автотракторных дизелей. Применение его в качестве моторного топлива позволяет снизить потребность не только в жидком нефтяном топливе, дефицит которого ощущается уже сегодня, но и содержание вредных веществ в отработавших газах, что является обязательным условием для соответствия двигателя международным нормам токсичности.

3.1. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

В соответствии с методикой стендовых испытаний нами были проведены испытания дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 по исследованию влияния применения природного газа на показатели процесса сгорания при различных установочных УОВТ.

Показатели процесса сгорания дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ при номинальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ представлены на рис. 3.1,а.

Анализ графиков показывает, что при снижении установочного УОВТ до 8° п.к.в. уменьшается максимальная температура газов в цилиндре с 2100 К до 2000 К при работе на дизельном топливе и с 2500 до 2400 К – при работе на природном газе, снижается максимальное давление газов. При увеличении установочного УОВТ до 14° п.к.в. при работе по газодизельному процессу резко повышается максимальное давление газов в цилиндре P_2 и максимальная температура T_{max} цикла. Максимальная жесткость

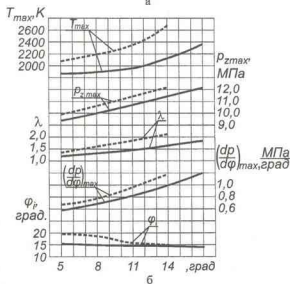
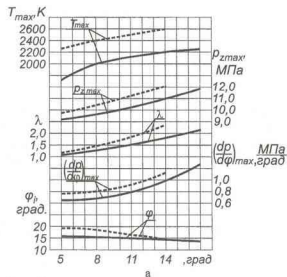


Рисунок 3.1 – Изменение показателей процесса сгорания дизеля с турбонадувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ:

а – $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

$(dp/d\varphi)_{\max}$ процесса сгорания при этом превышает 1,0 МПа/градус, что является недопустимой величиной для данного дизеля. Таким образом, установочный УОВТ 11° п.к.в. является оптимальным для дизельного и газодизельного процессов на частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. При этом установочном УОВТ жесткость процесса сгорания на газодизельном процессе составляет 0,9 МПа/градус, что находится в допустимых пределах для данного двигателя согласно данным завода-изготовителя.

На рис. 3.1,б представлены показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на частоте вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей режиму максимального крутящего момента при работе на дизельном топливе и при работе на природном газе.

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. При уменьшении установочного УОВТ до 8° п.к.в. происходит значительное деформирование дизеля по максимальному давлению газов в цилиндре, снижение максимальной жесткости процесса сгорания до 0,4 МПа/градус п.к.в. Это приводит к падению индикаторной мощности двигателя и росту температуры ОГ двигателя. При увеличении установочного УОВТ до 14° п.к.в. возрастают максимальные давление и температура процесса сгорания. Жесткость процесса сгорания на дизеле при этом составляет 1,0 МПа/градус, а при работе на КПГ - 1,2 МПа/градус, что является недопустимым для данного двигателя. Поэтому на режиме максимального крутящего момента угол 11° п.к.в. также является оптимальным для дизельного и газодизельного процессов.

3.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от 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 его экологические показатели при различных установочных УОВТ.

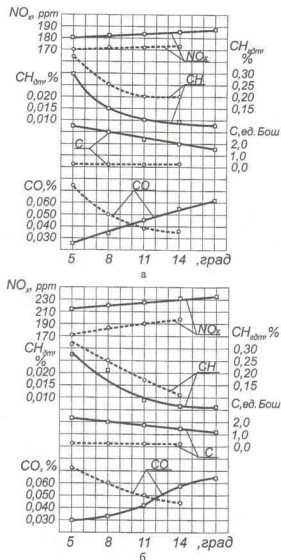


Рисунок 3.2 - Изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом в зависимости от установочного УОВТ:

а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Зависимости содержания токсичных компонентов в ОГ наддувного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 от установочного УОВТ при частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ представлены на рис. 3.2,а.

Из рисунка видно, что при увеличении установочного УОВТ растет содержание в ОГ оксидов азота NO_x и оксида углерода CO (при работе по чисто дизельному процессу). Содержание суммарных углеводородов CH_x , сажи C и оксида углерода CO (при работе по газодизельному процессу) при этом снижается. Необходимо отметить, что содержание сажи в ОГ при работе по газодизельному процессу практически не зависит от установочного УОВТ.

На рис. 3.2,б представлено содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ при частоте вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$.

Зависимости содержания основных токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом на режиме максимального крутящего момента от установочного УОВТ сохраняются. По сравнению с номинальным режимом работы возрастает содержание в ОГ оксидов азота NO_x в среднем на 24 %, содержание сажи C снижается при работе по дизельному процессу на 30 % по сравнению с номинальным режимом.

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 по дизельному и газодизельному процессам оптимальным является установочный УОВТ 11° п.к.в. , так как на этом угле суммарная токсичность ОГ минимальная. Данный УОВТ установлен заводом-изготовителем, и дальнейшие исследования рабочего процесса проводились при этом значении угла опережения впрыскивания топлива.

3.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания 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

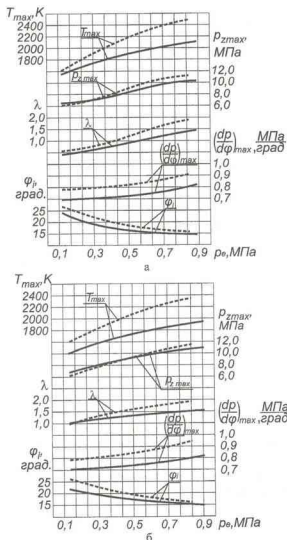


Рисунок 3.3 - Изменение показателей процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ \text{ п.к.в.}$: а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;
 — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

газа на показатели процесса сгорания на различных нагрузочных режимах.

Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от нагрузки при номинальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ представлено на рис. 3.3,а.

Анализ рисунка показывает, что с увеличением нагрузки возрастает максимальная температура газов в цилиндре до 2100 К при работе по дизельному процессу. Использование природного газа в качестве топлива повышает максимальную температуру газов до 2500 К, то есть на 19 %. Максимальное давление газов в цилиндре с увеличением p_e возрастает, достигая 10,2 МПа при работе по дизельному процессу и 11,2 МПа при газодизельном процессе. Таким образом, максимальное давление газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при переходе на газодизельный цикл возрастает на 9,8 % по сравнению с дизельным процессом.

Максимальная жесткость процесса сгорания $\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_{\max}$ при

увеличении нагрузки возрастает, достигая 0,8 МПа/градус на дизельном процессе и 0,9 МПа/градус на газодизельном, то есть возрастает на 12,5 %.

На рис. 3.3,б представлено влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от нагрузки при частоте вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$.

Зависимости изменения показателей процесса сгорания от нагрузки сохраняются, при этом T_{\max} снижается до 2350 К на газодизельном процессе, возрастает жесткость процесса сгорания при p_e большем 0,5.

3.4. Влияние применения природного газа на эксплуатационные и экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах

3.4.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные 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 эксплуатационные показатели на различных нагрузочных режимах.

Изменение мощностных и экономических параметров дизеля 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 $\Phi_{\text{нпр}} = 11^\circ$ п.к.в. представлены на рис. 3.4,а.

Анализ графиков показывает, что с увеличением нагрузки возрастает часовой расход топлива G_T , достигая на режиме номинальной мощности, соответствующей значению $p_e = 0,84 \text{ МПа}$, величины 18 кг/ч при работе по дизельному процессу и 17,6 кг/ч при работе по газодизельному процессу. Коэффициент избытка воздуха α при этом снижается до 1,9 на дизельном процессе. Из-за большей теплоты сгорания газа по сравнению с ДТ на газодизельном процессе возрастает температура ОГ (до 500 °С).

Удельный эффективный расход топлива g_e на режимах малых нагрузок при работе по газодизельному циклу выше, но при p_e большем 0,7 МПа g_e на газодизельном цикле становится ниже, чем при работе по дизельному циклу. Соответственно, эффективный КПД η_e , определяющий степень использования теплоты, у газодизеля при p_e меньших 0,7 МПа имеет меньшее значение по сравнению с дизельным вариантом и становится выше при p_e большем 0,7 МПа, достигая величины 0,40 на режиме номинальной мощности.

На рис. 3.4,б представлено изменение мощностных и экономических параметров дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при

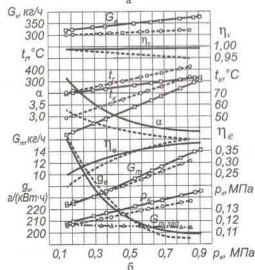
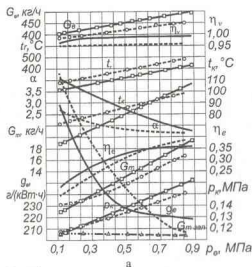


Рисунок 3.4 - Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в.:

а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— - дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

работе по дизельному и газодизельному процессам в зависимости от изменения нагрузки на режиме максимального крутящего момента при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$.

Основные зависимости изменения рассматриваемых показателей от нагрузки на этом режиме сохраняются. Расход воздуха при увеличении нагрузки монотонно возрастает, причем при работе на природном газе он меньше, чем при работе на дизельном топливе. Следует отметить некоторое снижение коэффициента наполнения цилиндров при увеличении нагрузки при работе на природном газе с 0,98 до 0,95, то есть на 3,1 %. Из-за снижения частоты вращения по сравнению с номинальным режимом снижается температура и давление наддувочного воздуха, а также температура ОГ. Удельный эффективный расход топлива с увеличением нагрузки снижается, причем на режиме малых нагрузок g_e выше при работе на природном газе.

Коэффициент избытка воздуха α при увеличении нагрузки снижается и достигает величины 2,4 при работе на дизельном топливе и 2,0 при работе на природном газе.

3.4.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах при работе на КПГ

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.

Изменение экологических показателей наддувочного 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 $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. представлено на рис. 3.5,а.

Из представленных графиков видно, что при работе по газодизельному циклу снижается содержание оксидов азота в ОГ практически во всем диапазоне изменения нагрузки. При $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ содержание оксидов азота в ОГ газодизеля на 8 % меньше, чем у дизеля. Наиболее существенно снижение содержа-

ния сажи в ОГ при переходе с дизельного на газодизельный процесс. Так, при работе на ДТ содержание сажи достигает 2,5 ед. по шкале Bosch, в то время как при работе на природном газе содержание сажи составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. Следует отметить, что при переходе на газодизельный процесс возрастает содержание углеводородов 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 топливовоздушной смеси. При этом происходит увеличение процентного содержания продуктов неполного сгорания в ОГ. Также при работе по газодизельному процессу возрастает содержание оксида углерода CO в ОГ, особенно на режимах малых нагрузок. Так, при $p_e = 0,1$ МПа содержание CO в ОГ дизеля составляет 0,036 %, а газодизеля – 0,059 %, что на 63,9 % больше. Однако при $p_e = 0,7$ 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.

Изменение экологических показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. представлено на рис. 3.5,б.

Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ при работе по дизельному и газодизельному процессам аналогичны рассмотренным выше. Изменяются лишь абсолютные значения. При $p_e = 0,84$ МПа содержание оксидов азота NO_x при переходе на газодизельный процесс снижается с 228 до 190 ppm, то есть на 16,7 %, содержание CO снижается с 0,047 до 0,039 %, то есть на 17 %. Содержание сажи в ОГ при работе по дизельному процессу снижается по сравнению с номинальным режимом и достигает при номинальных значениях нагрузки 2,0 единиц по шкале Bosch. Значения содержания сажи в ОГ при работе по газодизельному процессу во всем диапазоне нагрузок не превышает 0,1 единицы шкалы Bosch. Такое значительное снижение содержания сажи в ОГ газодизеля можно объяснить тем, что газодизель с турбонаддувом работает с высоким коэффициентом избытка воздуха, сильной турбулизацией заряда, обеспечивающими практически полное выгорание сажевых частиц в зо-

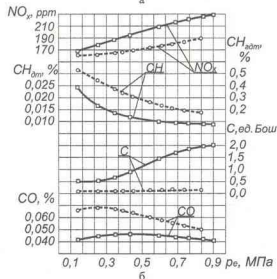
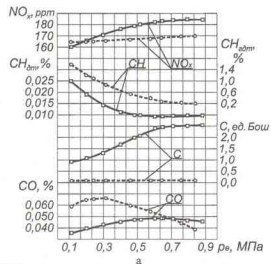


Рисунок 3.5 - Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в.:

а – $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

нах КС с высокой температурой и избытком окислителя. При этом содержание в ОГ газодизеля с турбонаддувом углеводородов СН возрастает по сравнению с дизельной модификацией, особенно на режимах малых нагрузок, и достигает 0,2 % на номинальной нагрузке. Проблему повышенного содержания в ОГ несгоревших углеводородов можно решить путем установки каталитического нейтрализатора ОГ.

3.5. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания 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 показатели процесса сгорания в зависимости от частоты вращения.

Показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом при работе по дизельному и газодизельному процессам при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ п.к.в. в зависимости от частоты вращения представлены на рис. 3.6,а.

Анализ графиков показывает, что все показатели процесса сгорания при газодизельном процессе лежат выше показателей дизельного процесса во всем диапазоне частот вращения. Характер изменения всех показателей при газодизельном процессе в зависимости от частоты вращения полностью повторяет характер изменения при дизельном процессе. Следует отметить некоторое снижение жесткости процесса сгорания и максимального давления газов в цилиндре с увеличением частоты вращения коленчатого вала, снижение максимального давления газов в цилиндре с 11,2 МПа при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 10,2 МПа при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, то есть на 8,9 % при работе на дизельном топливе; при работе на природном газе $P_{z \text{ max}}$ снижается с 12,0 до 11,2 МПа, то есть на 6,7 % с увеличением частоты вращения от 1200 до 2400 мин^{-1} .

Максимальная температура цикла с увеличением частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} возрастает с 1820 до 2170 К при

дизельном процессе и с 2150 до 2530 К – при газодизельном процессе.

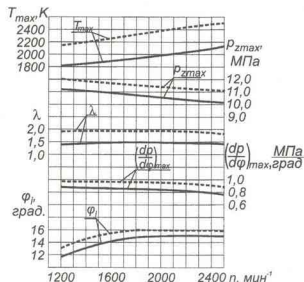


Рисунок 3.6 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ п.к.в.:

— дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

3.6. Влияние применения природного газа на эксплуатационные и экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения

3.6.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные 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 эксплуатационные показатели в зависимости от частоты вращения.

Зависимости эксплуатационных показателей работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. в зависимости от частоты вращения без регуляторной ветви представлены на рис. 3.7,а.

С увеличением частоты вращения возрастает часовой расход воздуха G_T с 220 кг/ч при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 530 кг/ч при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, то есть в 2,4 раза. Такое увеличение расхода воздуха связано с ростом производительности турбокомпрессора, что видно по графику изменения давления p_k наддувочного воздуха. Оно меняется от 0,11 МПа при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 0,17 МПа при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, то есть на 54,5 %. При этом необходимо отметить, что при работе по газодизельному циклу расход воздуха и давление наддува ниже дизельного процесса в среднем на 6 %.

При увеличении частоты вращения дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 растет и часовой расход топлива, причем на газодизельном процессе он находится ниже кривой чисто дизельного процесса во всем рассматриваемом диапазоне частот вращения. Соответственно, при сохранении мощностных показателей газодизельной модификации на уровне базового дизеля это приводит к снижению удельного эффективного расхода топлива g_e , то есть к большей экономичности газодизеля.

Величина запальной порции дизельного топлива при увеличении частоты вращения возрастает с 1,8 до 3,2 кг/ч, что объясняется повышением стабильности работы ТПА и снижением гид-

равлических потерь с ростом частоты вращения. Наряду с возрастанием давления наддувочного воздуха увеличивается и его температура, достигая на номинальном режиме 105°C .

Значение коэффициента избытка воздуха α при повышении частоты вращения незначительно снижается, при этом 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.

Температура ОГ дизеля и газодизеля с турбонаддувом при повышении частоты вращения монотонно возрастает.

Зависимости эксплуатационных показателей работы наддувочного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. в зависимости от частоты вращения при включенном регуляторе представлены на рис. 3.7,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 α . 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.

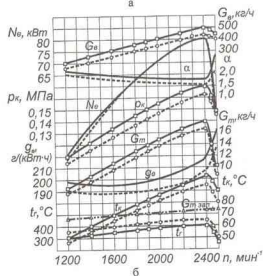
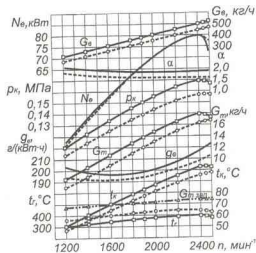


Рисунок 3.7 - Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при $\Theta_{\text{всп}} = 11^\circ$ п.к.в.:

а – регулятор выключен; б – регулятор включен;
 — — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс

3.6.2. 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. 3.8 представлено изменение содержания основных токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом при работе по дизельному и газодизельному циклу в зависимости от частоты вращения на различных установочных УОВТ.

При изменении установочного УОВТ прослеживается четкая зависимость изменения сажеосодержания в ОГ дизеля. Чем больше установочный УОВТ, то есть раньше подается топливо, тем меньше содержание сажи в ОГ дизеля. При этом с увеличением частоты вращения содержание сажи в ОГ дизеля плавно возрастает. При работе по газодизельному процессу содержание сажи в ОГ практически не зависит от установочного УОВТ, а с повышением частоты вращения повышается с 0,1 до 0,2 ед. по шкале Bosch, что, на наш взгляд, объясняется ростом величины запальной порции дизельного топлива.

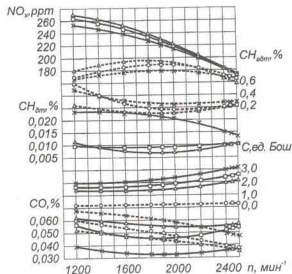


Рисунок 3.8 - Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения:

- — — — — дизельный процесс; - - - - - газодизельный процесс
- × — × — дизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ п.к.в.
- — ○ — дизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в.
- △ — △ — дизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ п.к.в.
- × — × — газодизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ п.к.в.
- — ○ — газодизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в.
- △ — △ — газодизельный процесс, $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ п.к.в.

3.7. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на сажесодержание в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на КПГ

3.7.1. Изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала

С помощью программы для определения массовой и относительной концентрации сажи в цилиндре дизеля нами была рассчитана массовая S и относительная g концентрация сажи в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

На рис. 3.9 представлено изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала на номинальном режиме работы при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. Из графика видно, что начало видимого сгорания топлива начинается через $2^\circ \dots 3^\circ$ после ВМТ. 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 концентрации сажи в цилиндре дизеля в результате преобладающего влияния процесса сажеобразования над ее выгоранием. На этом участке пламя быстро распространяется на весь объем подготавливаемой к сгоранию за ПЗВ смеси.

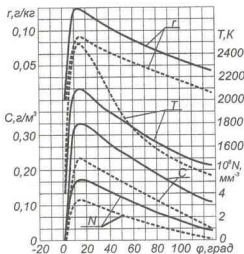


Рисунок 3.9 - Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{нр}} = 11^\circ$ п.к.в. и $n = 2400$ мин⁻¹:

— - дизель; - - - - газодизель

Образование сажи происходит преимущественно в ядре струи запального дизельного топлива в результате термического и окислительного пиролиза топлива в условиях недостатка окислителя. На начальном этапе преобладающим механизмом сажеобразования является НТФМ. Быстрое расширение фронта пламени обуславливает увеличение количества топлива, сгорающего в этом фронте по диффузионному механизму, а следовательно, и соответствующий рост массовой выхода сажи. В условиях повышенной турбулентности заряда основная масса образующейся сажи выносится 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 сажеобразование продолжает увеличиваться. На этом участке основным механизмом образования сажи является ВТАМ. Образовавшаяся в результате физико-химических превращений топлива частицы сажи окисляются, так как температура газов становится достаточно высокой, а общий коэффициент избытка воздуха высоким.

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 турбонаддувом 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.

Изменение относительной концентрации сажи в цилиндре двигателя в зависимости от угла поворота коленчатого вала аналогично изменению массовой концентрации. При этом максимальное значение относительной концентрации r составляет 0,133 г/кг при работе по дизельному процессу и 0,093 г/кг при работе по газодизельному процессу. После достижения максимального значения относительная концентрация сажи снижается до открытия выпускных клапанов и составляет 0,044 и 0,012 г/кг, соответственно, для дизельного и газодизельного процессов.

Сильное влияние на излучательную способность 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 модальным радиусом частиц 20 нм.
2. Плотность сажевых частиц не зависит от механизма образования и составляет 1,9 г/см³.

На основании этих допущений расчетное максимальное количество сажевых частиц составляет $5,2 \cdot 10^6$ в мм^3 для дизельного процесса и $3,6 \cdot 10^6$ в мм^3 для газодизельного процесса. После достижения максимума при дальнейшем повороте коленчатого вала количество сажевых частиц снижается пропорционально снижению массовой концентрации.

На рис. 3.10 представлено изменение показателей сажесодержания и температуры газов в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала на режиме максимального крутящего момента при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $p_c = 0,92 \text{ МПа}$.

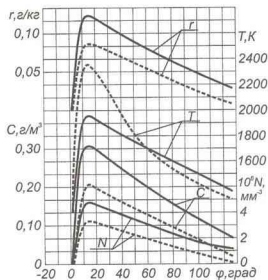


Рисунок 3.10 — Изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:
 ——— дизель; - - - - газодизель

Основные зависимости изменения показателей сохраняются, при этом максимальная массовая концентрация сажи снижается до $0,31$ и $0,21 \text{ г/м}^3$, соответственно, для дизельного и газодизельного процессов. Снижается и массовая концентрация сажи в момент открытия выпускных клапанов $C_{\text{вып}}$ и составляет $0,07$ и

$0,02 \text{ г/м}^3$, соответственно, для дизельного и газодизельного процессов. Пропорционально снижению массовой концентрации снижаются и остальные показатели сажесодержания.

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. 3.11,а и 3.11,б представлено изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ п.к.в. на номинальном режиме и режиме максимального крутящего момента, соответственно.

При уменьшении установочного УОВТ до 8° п.к.в. на номинальном режиме наблюдается снижение максимальной температуры цикла как по дизельному, так и по газодизельному процессам по сравнению с оптимальным установочным УОВТ на 4,8 и 2,1 %, соответственно. Следовательно, возрастает результирующее сажесодержание на 36 % на дизеле и незначительно на газодизеле из-за смещения процесса сгорания и сажеобразования вправо от ВМТ.

При этом пропорционально увеличивается относительная концентрация г сажи в цилиндре дизеля. Максимальная относительная концентрация g сажи достигает $0,153$ и $0,100 \text{ г/кг}$, соответственно для дизельного и газодизельного процессов, то есть возрастает по сравнению с оптимальным $\Theta_{\text{впр}}$ на 11,9 и 12,5 %, соответственно. А в момент открытия выпускного клапана относительная концентрация g составляет $0,060$ и $0,016 \text{ г/кг}$, соответственно.

При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ до 8° п.к.в. увеличивается и количество частиц сажи в единице объема. Максимальное количество частиц составляет $6 \cdot 10^6$ и $3,8 \cdot 10^6$ в мм^3 , соответственно, для дизельного и газодизельного процессов, то есть возрастает по сравнению с оптимальным $\Theta_{\text{впр}}$ на 15,4 и 8,6 %, соответственно.

На режиме максимального крутящего момента (см. рис. 3.11,б) снижение максимальной температуры цикла по сравне-

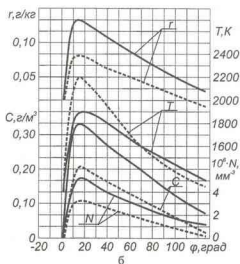
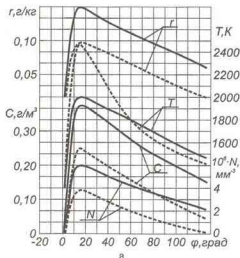


Рисунок 3.11 - Изменение показателей сажеосодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ п.к.в.:

а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;
 ——— дизель; - - - - газодизель

нию с оптимальным установочным УОВТ составляет 3,1 и 6,4 %, соответственно, для дизельного и газодизельного процессов. Результирующее 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 практически не увеличивается. Подобную зависимость можно объяснить тем, что метан CH_4 является наименее склонным к сажеобразованию углеводородом, 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 α .

Соответственно изменяются и значения относительной концентрации сажи в цилиндре дизеля и количество сажевых частиц N в единице объема.

Таким образом, при уменьшении установочного УОВТ с 11 до 8° п.к.в. происходит увеличение сажеосодержания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 из-за снижения осредненной 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 $\Theta_{\text{впр}}$ из-за малой склонности природного газа к сажеобразованию.

На рис. 3.12,а и 3.12,б представлены, соответственно, показатели сажеосодержания и температуры цикла в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ п.к.в. и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ при работе по дизельному и газодизельному процессам.

При более раннем по сравнению с оптимальным установочным УОВТ наряду с увеличением жесткости процесса сгорания возрастает и максимальная температура 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 ВМТ. Одновременно с этим снижается результирующее

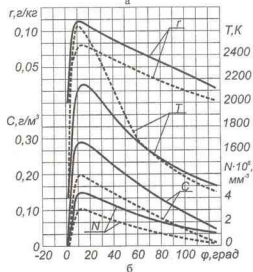
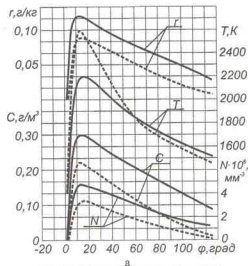


Рисунок 3.12 - Изменение показателей сажеосодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала при $\Theta_{\text{нр}} = 14^\circ$ п.к.в.:

а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;
 ——— дизель; - - - - газодизель

сажеосодержание в цилиндре двигателя и дымность ОГ. Массовая концентрация сажи в ОГ дизеля составляет $0,08$ и $0,020 \text{ г/м}^3$ - у газодизеля. То есть на дизельном процессе снижается на $9,9\%$ по сравнению с оптимальным установочным УОВТ. Соответственно снижается и относительная концентрация сажи в ОГ и количество частиц сажи в единице объема.

На режиме максимального крутящего момента при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ (см. рис. 3.12,б) максимальная температура цикла по сравнению с этим же режимом при оптимальном УОВТ $\Theta_{\text{нр}} = 11^\circ$ п.к.в. возрастает с 2350 до 2650 K , то есть на $12,8\%$, при газодизельном процессе и с 1960 до 2150 K , то есть на $9,7\%$, при дизельном процессе. Результирующее сажеосодержание в цилиндре дизеля снижается с $0,05$ до $0,01 \text{ г/м}^3$, то есть на $80,0\%$. Соответственно снижается и относительная концентрация сажи в ОГ и количество частиц сажи в единице объема.

Таким образом, увеличение установочного УОВТ по сравнению с оптимальным позволяет снизить значения показателей сажеосодержания в цилиндре дизеля при работе на дизельном топливе.

3.7.2. Изменение показателей сажеосодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

На рис. 3.13,а представлены максимальные показатели содержания сажи и максимальная температура в цилиндре в зависимости от установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$.

Анализ представленных графиков показывает, что с увеличением установочного УОВТ возрастает максимальная температура цикла и снижается максимальная концентрация сажи в цилиндре при работе как по дизельному, так и по газодизельному процессам. Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением установочного УОВТ улучшаются экологические показатели

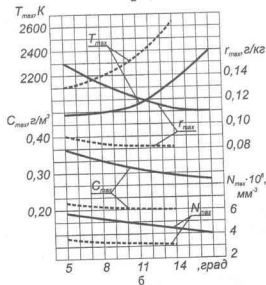
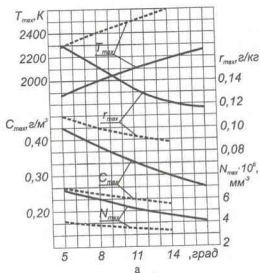


Рисунок 3.13 - Изменение показателей сажеосодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ: а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$; — — — — дизель; — — — — газодизель

ли дизеля за счет снижения дымности ОГ, но возрастает жесткость процесса сгорания и теплонапряженность двигателя.

На рис. 3.13,б представлены максимальные показатели содержания сажи и максимальная температура в цилиндре в зависимости от 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 в единице объема

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 показателей процесса сгорания и, прежде всего, жесткости процесса сгорания.

3.7.3. Изменение показателей сажеосодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

На рис. 3.14,а представлены максимальные показатели содержания сажи и максимальная температура в цилиндре двигателя в зависимости от нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. при работе по дизельному и газодизельному процессам при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$.

При увеличении нагрузки на частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит увеличение содержания сажи в ОГ и температуры цикла. Это связано с увеличением цикловой подачи топлива, но с ростом температуры увеличивается скорость окисления сажевых частиц и, соответственно, доля выгорающей сажи. Высокие турбулентизация зряда и коэффициент избытка воздуха позволяют снизить содержание сажи в ОГ дизеля до норм Евро-1, а газодизеля – до норм Евро-4.

На рис. 3.14,б представлены максимальные показатели содержания сажи и максимальная температура в цилиндре двигателя

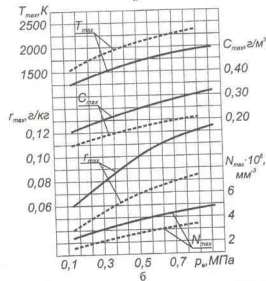
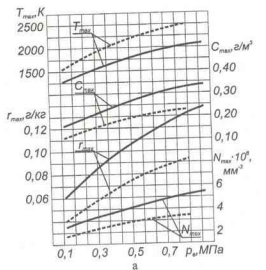


Рисунок 3.14 - Изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в.:

а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— - дизель; - - - - газодизель

ля в зависимости от нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ 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 температуры в цилиндре от изменения нагрузки сохраняются. С увеличением нагрузки возрастает максимальная температура цикла, при этом максимальная температура газодизельного процессов находится выше значений температуры дизельного процессов. Максимальное сажесодержание в цилиндре двигателя возрастает, но становится меньше, чем на номинальном режиме.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что применение природного газа позволяет снизить показатели сажесодержания в цилиндре во всем диапазоне изменения нагрузки.

3.7.4. Изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения

На рис. 3.15. представлено изменение показателей сажесодержания и температуры в цилиндре дизеля в зависимости от частоты вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ п.к.в. и работе по дизельному и газодизельному процессам.

При увеличении частоты вращения происходит возрастание максимальной температуры цикла и максимального сажесодержания в цилиндре дизеля с турбонаддувом. При низкой частоте вращения максимальное массовое сажесодержание ниже, так как 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 сажесодержания при работе по газодизельному процессу находятся ниже аналогичных значений дизельного процесса на всех рассматриваемых скоростных режимах.

Максимальная относительная концентрация сажи в цилиндре дизеля при работе на природном газе также находится ниже аналогичных значений дизельного процесса.

Максимальное количество частиц сажи в единице объема в цилиндре двигателя соответственно тоже возрастает с увеличением частоты вращения, что связано с увеличением максимальной массовой концентрации сажи в цилиндре.

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 сажеобразование в ОГ и тем самым улучшить экологические показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.12С) за счет снижения дымности ОГ.

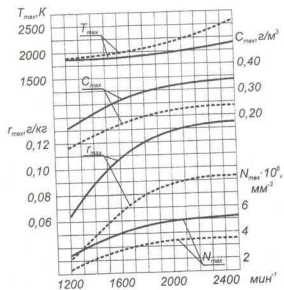


Рисунок 3.15 - Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ п.к.в.:

— дизель; - - - - газодизель

4. РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АВТОБУСА ПАЗ-32054-12 С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ НА КПГ

4.1. Разработка требований к системе дозирования и регулирования подачи природного газа в цилиндры дизеля с турбонаддувом Д-245.12С автобуса ПАЗ-32054-12

Отличительной особенностью газодизелей является возможность их работы как по газодизельному процессу, так и чисто по дизельному. При этом необходимо обеспечить возможность быстрого перехода работы дизеля с одного топлива на другое и обратно. Исходя из условия сохранения штатной топливоподающей аппаратуры, нами предложена ее модернизация для регулирования топливоподачи при работе по газодизельному процессу.

Основными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому газодизелю, являются:

1. Сохранение мощностных параметров работы двигателя на уровне дизельной модификации.
2. Сохранение конструкции базового двигателя.
3. Возможность перехода с одного вида топлива на другой в процессе работы двигателя.
4. Обеспечение равномерного распределения метановоздушной смеси по цилиндрам двигателя на различных нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя.
5. Обеспечение высокой надежности и долговечности в эксплуатации устанавливаемого дополнительного оборудования.

Газовоздушная смесь образуется в смесителе-дозаторе, разработанном в Вятской ГСХА, установленном перед турбокомпрессором, и поступает во впускной трубопровод за счет разрежения, создаваемого компрессором.

Для обеспечения всережимного регулирования частоты вращения коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам модернизирован всережимный регулятор частоты вращения дизеля.

Система регулирования газодизеля Д-245.12С с насосом типа 4УТНМ позволяет переводить двигатель с дизельного процес-

са на газодизельный и наоборот, обеспечивать запальную порцию дизельного топлива на уровне $12 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ за счет фиксации рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) и работу газодизеля по всережимной характеристике.

Фиксация рейки топливного насоса осуществляется специальным электромагнитным клапаном, устанавливаемым на корпусе регулятора со стороны рычага управления регулятором. В момент фиксации рейки второй электромагнитный клапан, соединенный с первым электрической связью, открывает подачу газа. Для изменения подачи газа перемещением основного рычага регулятора происходит открывание или закрывание газовой заслонки. Таким образом осуществляется качественное регулирование состава газозвоздушной смеси при нерегулируемой подаче воздуха на впуске к турбокомпрессору.

4.2. Разработка и создание макетного образца автобуса ПА3-32054-12 для работы на сжатом природном газе

В Вятской ГСХА изготовлен и на базе опытного учебного хозяйства ФГУП «Чистые пруды» проходит эксплуатационные испытания макетный образец автобуса ПА3-32054-12 с системой питания, модернизированной для работы на КПГ. Макетный образец автобуса оснащался серийной газобаллонной аппаратурой отечественного производства. Суммарная емкость баллонов составляла 250 литров и обеспечивалась установкой пяти баллонов из металлопластика на крыше автобуса (см. рис. 5.1 и 5.2). Редуктор высокого давления и заправочная горловина располагаются с правой стороны автобуса около моторного отсека (см. рис. 5.3). Газовый редуктор низкого давления располагается в моторном отсеке над двигателем с правой стороны. Газовые баллоны с редуктором высокого давления соединяются стальными трубками, далее газопроводы представляют собой гибкие шланги (см. рис. 5.4).



Рисунок 5.1 - Компоновка и крепление газовых баллонов высокого давления на крыше автобуса

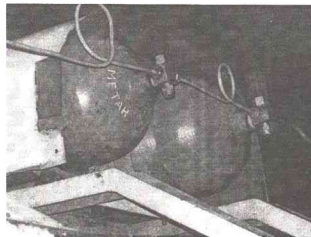


Рисунок 5.2 - Внешний вид газовых баллонов

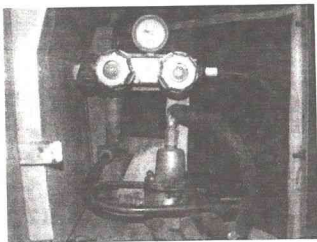


Рисунок 5.3 - Вид на заправочную горловину и редуктор высокого давления

Запуск двигателя осуществляется на дизельном топливе. После запуска переход на газодизельный процесс осуществляется переключателем, расположенным на панели приборов. Модернизированная система питания позволяет при работе по газодизельному процессу замещать до 85 % дизельного топлива природным газом. Величина запальной порции дизельного топлива не изменяется в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы двигателя.

Требуемые изменения в конструкции регулятора топливного насоса не требуют значительных конструктивных изменений и могут быть внесены как на новом, так и на бывшем в эксплуатации ТНВД.

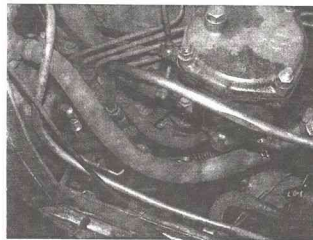


Рисунок 5.4 - Вид на шланг для подвода природного газа

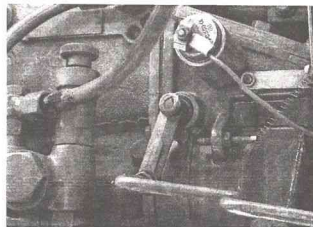


Рисунок 5.5 - Вид на топливный насос высокого давления электромагнитным клапаном для работы на КПГ

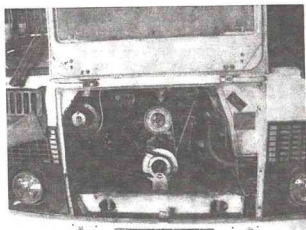


Рисунок 5.6 - Внешний вид дизеля 4ЧН 11,0/12,5, установленного на автобусе ПАЗ-32,54

Таблица 5.1 - Техническая характеристика автобуса ПАЗ-32054-12

Показатель	Величина
1. Рабочий объем двигателя, л	4,75
2. Марка турбокомпрессора	ТКР-6
3. Степень сжатия	16
4. Тип камеры сгорания	в поршне типа ЦНИДИ
5. Номинальная мощность, кВт (л.с.)	80 (109)
6. Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2400
7. Расход газа на номинальном режиме:	
- природного газа, кг/ч	14
- дизельного топлива, кг/ч	3
8. Суммарный запас газа, м ³	50
9. Давление газа в баллоне, МПа	20
10. Количество баллонов, шт	5
11. Масса баллонов, кг	310

Продолжение таблицы 5.1.

12. Снижение выбросов токсичных компонентов (на номинальном режиме), %	
- сажи	96
- оксидов азота	8
- СО	19
13. Запас хода при работе на природном газе, км	215
14. Запас хода при работе на дизельном топливе, км	525

4.3. Оценка экономической эффективности использования природного газа в качестве моторного топлива в дизеле с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5, установленном на автобусе ПАЗ

Оценка экономической эффективности применения КПГ в качестве моторного топлива с экономической точки зрения затруднена тем, что отсутствует единая методика, регламентирующая проведение комплексной оценки экономической эффективности при использовании альтернативных топлив. При проведении подобной оценки необходимо учитывать снижение содержания токсичных компонентов в ОГ, разницу в стоимости традиционного и альтернативного топлива, стоимость дополнительного оборудования и приспособлений.

Необходимо учитывать вклад различных составляющих ОГ в их суммарную токсичность. Поэтому оценка вредности выбросов двигателя, определение наиболее токсичных компонентов ОГ и сравнение эффективности предложенных мероприятий с экологической точки зрения тоже достаточно затруднительны. Для решения этих задач обычно вводят понятие приведенной (суммарной) токсичности ОГ двигателя.

Для определения экономического эффекта использования КПГ в качестве топлива нами предлагается использовать «Временную типовую методику определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий» [27, 28].

Согласно данной методике, эффективность применения КПГ в качестве моторного топлива можно оценить по снижению

экономического ущерба, наносимого народному хозяйству страны загрязнением окружающей среды.

Величина ущерба, наносимого при попадании в атмосферу 1 кг загрязняющего вещества (в руб./кг), согласно принятой методике, определяется по формуле

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot B, \quad (6.1)$$

где γ – размерный коэффициент, переводящий балльную оценку ущерба в стоимостную (руб./усл. кг), $\gamma = 0,1001$ руб./усл. кг (в ценах на 2006 год);

σ – показатель относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха над территорией определенного типа, $\sigma = 6$ – для жилых районов городов;

f – поправка, учитывающая характер рассеяния отработавших газов в атмосфере, $f = 10$ – для выброса аэрозолей автотранспортными средствами;

B – доля отдельного компонента в суммарном ущербе.

Доля B отдельного компонента ОГ в суммарном ущербе определяется по выражению

$$B_i = \frac{M_i}{\sum m_i}, \quad (6.2)$$

где M_i – приведенный выброс i -го компонента ОГ, усл. кг/(кВт·ч);

$\sum m_i$ – приведенный выброс всех вредных компонентов отработавших газов.

Приведенный выброс M_i i -го компонента ОГ определяется по формуле

$$M_i = A_i \cdot m_i, \quad (6.3)$$

где A_i – показатель относительной агрессивности данного компонента, усл. кг/кг;

m_i – выброс i -го компонента ОГ, кг/(кВт·ч).

Показатель A_i относительной агрессивности компонентов ОГ принимается на основании [27, 28]: $A_{CO} = 1$; $A_{NOx} = 41,1$,

$A_{CH} = 3,16$, $A_C = 200$.

Принимая значения постоянных величин по рекомендациям [10, 13, 261, 262], получаем после расчета значение экономической эффективности от снижения ущерба, наносимого токсичными компонентами, выбрасываемыми в атмосферу с ОГ дизеля, равное 2402 руб. на 1 автомобиль в год, а газодизельной модификации – 1396 руб. на 1 автомобиль в год при среднем годовом пробеге 60000 км.

Расчет ущерба по выражению (6.1), выполненный для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 автобуса ПА3, работающего на компримированном природном газе, показал, что экономическая эффективность от снижения ущерба, наносимого токсичными компонентами, выбрасываемыми в атмосферу с ОГ, составит не менее 1006 руб. на 1 автобус в год (в ценах 2006 года), что ниже дизельной модификации на 58 %. Тем самым в значительной степени ослабляются экологические проблемы эксплуатации этих дизелей.

При расчете экономического эффекта от применения КПГ нами принимаются следующие допущения:

- запальная порция ДТ не зависит от нагрузки двигателя и частоты вращения и составляет 3 кг/ч;
- плотность ДТ принимается равной $0,82 \text{ кг/дм}^3$;
- расчет ведется для скорости движения автотранспортного средства 50 км/ч;
- расход природного газа составляет порядка 60 % от номинального режима;
- стоимость одного литра ДТ равна 17,5 руб./л, стоимость одного м^3 КПГ равна 6,50 руб. (цены действительны на апрель 2006 г.).

Расчет ведется на 100 км пробега.

При скорости движения 50 км/ч расход запального ДТ составит 6 кг/100 км. Таким образом, на 100 км пробега расход ДТ составит

$$6/0,82 = 7,3 \text{ л/100 км.}$$

Стоимость ДТ составит

$$7,3 \cdot 17,5 = 128 \text{ руб./100 км.}$$

Принимаем расход природного газа $12 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При скорости движения 50 км/ч расход газа на 100 км составит 24 м^3 .

Таким образом, затраты на КПГ на 100 км составят
 $24 \cdot 6,50 = 156$ руб.

Итого стоимость затрат на топливо при работе двигателя по газодизельному процессу составит
 $128 + 156 = 284$ руб./100 км.

При работе по чисто дизельному процессу расход ДТ составляет 20 л/100 км. Затраты на топливо при этом составляют
 $20 \cdot 17,5 = 350$ руб.

Таким образом, экономия средств за счет применения более дешевого вида топлива (КПГ), при переходе на газодизельный процесс составляет

$$350 - 284 = 66 \text{ руб./100 км.}$$

При годовом пробеге 60 тыс. км экономия на топливе составит 39600 руб./год.

Стоимость перевода дизеля на газодизельный цикл работы складывается из стоимости оборудования и стоимости установки.

Стоимость отечественного газобаллонного оборудования для автобуса ПАЗ составляет 22800 руб.

Стоимость его установки и подключения – 19676 руб.

Итого стоимость перевода автобуса ПАЗ на КПГ составляет

$$22800 + 19676 = 42476 \text{ руб.}$$

Таким образом, срок окупаемости перевода автобуса ПАЗ-32054-12 на КПГ составляет около одного года, не считая экономии за счет снижения токсичности ОГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ скоростного режима работы газодизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе его 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, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 75-81.
2. Бакиров Ф.Г. Образование сажи при горении гомогенных гексановоздушных смесей при давлении до 1,5 МПа // Физика горения и взрыва. - 1983. - № 2. - С. 51-56.
3. Баранов Н.А. Разработка методов и проведение экспериментальных исследований на двигателе условий образования и физических свойств дизельной сажи: Дисс...канд. техн. наук / ЦНИДИ. - Л., 1981. - 142 с.: ил.
4. Баранов В.Г., Пугачев Б.П. Основы расчета процессов смесяобразования 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.
5. Баранов Н.А., Смайлес В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи // Экспериментальные и теоретические исследования по созданию новых дизелей и агрегатов / Труды ЦНИДИ. - Л., 1980. - С. 82-87.
6. Батурин С.А., Байков А.Б. Обобщенный анализ процесса сажевыделения в дизелях с впрыскиванием топлива в неразделенную камеру сгорания // Двигателестроение. - 1988. - № 2. - С. 8-9, 21.
7. Батурин С.А., Журавлев А.Н. К вопросу об определении степени черноты пламени в цилиндре дизеля // Проблема создания и использования двигателей с высоким наддувом. - Харьков, 1979. - С. 392-394.
8. Батурин С.А., Звонов В.А., Фурса В.В. О величине локальных температуры сгорания в цилиндре дизеля // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков, 1979. - №29. - С. 38-45.
9. 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.
10. Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование динамики сажевыделения и температуры пламени на неустановившихся режимах работы дизеля ЯМЗ-238НБ // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Сб. науч. тр. - Барнаул, 1978. - С. 40-53.
11. Батурин С.А., Ложкин В.Н., Степанов В.Н. Методика и некоторые результаты исследования излучательных характеристик пламени автотракторного дизеля при неустановившихся режимах работы // Рабочие процессы компрессоров и двигателей внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. ЛПИ. -

- Л., 1980. - № 370. - С. 48-53.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Батурин С.А., Синицын В.А. Математическое моделирование локального лучистого теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - № 6. - С. 15-18.
16. Батурин С.А., Синицын В.А. Физические условия и определяющие показатели радиационного теплообмена в дизелях // Двигателестроение. - 1982. - № 12. - С. 14-16.
17. Бахир Л.П., Жданович О.Б. Спектральная излучательная способность продуктов сгорания дизельного топлива в области спектра 2,0-5,5 мкм // Физика горения и взрыва. - 1976. - № 1. - С. 75-81.
18. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 432 с.: ил.
19. Блох А.Г., Молдашевская М.Л., Быстров Н.Г. Радиационные характеристики полидисперсных систем частиц углерода в свечящемся пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - № 5. - С. 37-41.
20. Блох А.Г., Шелоков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Часть 1 // Инженерно-физический журнал. - 1990. - Т. 59. - № 3. - С. 492-499.
21. Блох А.Г., Шелоков А.И. Математическая модель сажеобразования при сжигании природного газа. Часть 2 // Инженерно-физический журнал. - 1992. - Т. 62. - № 6. - С. 831-839.
22. Блох А.Г., Шелоков А.И. Влияние механизма пиролиза метана на излучающие свойства факела природного газа // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. третьего Минского межд. форума по тепломассообмену. - Минск, 1996. - Т. 2. - С. 40-41.
23. Бородина Н.М., Теснер П.А. Кинетика образований пироуглерода из ацетилена // Химия твердого топлива. - 1978. - № 6. - С. 140-143.
24. Веденягин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. - М.: Колос, 1973. - 199 с.
25. Веселов С.Н., Заклязьменский Л.А., Маркачев Ю.Е. Численное моделирование горения углерода в воздухе // Физика горения и взрыва. - 1986. - № 3. - С. 38-44.
26. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходных дизе-

- лей на свойства сажи и отработавших газов / М.М. Вихерт, А.П. Кратко, И.С. Рафаэльск, Г.А. Смирнов, П.А. Теснер // Автомобильная промышленность. - 1975. - № 10. - С. 8-11.
27. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба / Л.В. Вершков, В.Л. Гроцев, В.В. Гаврилов и др. - М. - 1999. - 68 с.
28. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский и др. - М.: Экономика, 1986. - 96 с.
29. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Свистунов Н.Н., Фомин Н.Н. Перспективы и проблемы перевода судовых дизелей на газовое топливо // Двигателестроение. - 1998. - № 1. - С. 8-9.
30. Гейдон А.Г. Спектроскопия пламен / Пер. с англ. Под ред. В.Н. Кондратьева. - М.: Издательство иностранной литературы, 1959. - 381 с.: ил.
31. Гейдон А.Г., Волфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / Пер. с англ. Н.С. Чернецкого. Под ред. С.А. Гольдберга. - М.: Металлургия, 1959. - 333 с.: ил.
32. Генкин К.И., Аксенов Д.Т., Струнге Б.Н. Газовые двигатели ГД-100 и агрегаты на их базе. - Л.: Недра, 1970. - 238 с.
33. Генкин К.И. Газовые двигатели. - М.: Машиностроение. - 1977. - 196 с.
34. Гетманец Г.В., Лиханов В.А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта. - М.: Аспол, 1993. - 340 с.
35. Глязлетдинов Л.П. Кинетика и механизм образования сажи при термическом разложении углеводородов в газовой фазе // Химия твердого топлива. - 1972. - № 3. - С. 103-111.
36. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. - М.: Энергоиздат, 1983. - 176 с.: ил.
37. Головина Е.С. О константе скорости химической реакции и коэффициента реакционного газообмена газификации углерода // Шестой Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву: Сб. материалов. - Черноголовка, 1980. - С. 106-110.
38. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Изд-во РУДН, 1998. - 214 с., ил.
39. Гордич Б.Ф., Шелепин Л.А., Шмоткин Ю.С. Аналитическая модель сажеобразования // Физика горения и взрыва. - 1982. - № 2. - С. 71-76.
40. ГОСТ 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 11 с.
41. ГОСТ 27577-2000 Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2001. - 7 с.

42. Гоц А.Н., Мацаренко И.П., Мокеева В.Н. Тенденции развития автотранспортных и тракторных дизелей за рубежом // Двигателестроение. - 1992. - № 8-9. - С. 65-67.
43. Григорьев Е.Г., Колубаев Б.Д., Ерохов В.И. Газобаллонные автомобили. - М.: Машиностроение. - 1989. - 216 с.
44. Гуляев С.А. Сжатый газ как моторное топливо // Автомобильная промышленность. - 1995. - № 2. - С. 28-30.
45. Динамика образования сажевых частиц в пламени при сжигании распыленного жидкого топлива / М.Б. Страдомский, Е.А. Максимов, В.Н. Козленко, Е.А. Ефремова // Промышленная теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 3. - С. 95-97.
46. Долганов К.Е. Автомобильные газодизели // Двигателестроение. - 1995. - № 5. - С. 6-10.
47. Дьяченко Н.Х., Батулин С.А., Ложкин В.Н. Исследование температуры и излучательной способности турбулентного сажистого пламени в циклических процессах сгорания // Теплоэнергетика: Труды ЛПИ. - Л., 1977. - № 358. - С. 96-100.
48. Дьяченко Н.Х., Батулин 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.
49. Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. - М.: Транспорт, 1985. - 120 с.
50. Жегалин О.И., Сайкин А.М., Френкель А.И. Методы снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей. - М.: ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1976. - 30 с.
51. Закинтаев Л.С., Кишнян А.А., Ромашков В.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
52. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.
53. Иванченко Н.Н., Семенов Б.Н., Соколов В.С. Рабочие процессы дизелей с камерой в поршне. - Л.: Машиностроение. - 1972. - 228 с.
54. Изучение распределения сажевых частиц при сгорании распыленного жидкого топлива / М.Б. Страдомский, Е.А. Максимов, А.Г. Плита, Е.А. Ефремова // Промышленная теплотехника. - 1988. - Т. 10. - № 3. - С. 84-88.
55. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б.С. Стефановский, Е.А. Скобцов, Е.К. Корси и др. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
56. 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.
57. Исследование эмиссионных характеристик факела при горении жидких топлив / М.В. Страдомский, Е.П. Васильев, В.И. Козленко, Е.А. Ефремова

- // Теплофизика и теплотехника: Респ.сб. - Киев: Наукова думка, 1975. - Вып. 29. - С. 18-23.
58. Карницкий В.В., Валеев Д.Х., Фучкин С.В. Опыт эксплуатации газодизельных КамАЗов // Автомобильная промышленность. - 1992. - № 8. - С. 20-21.
59. Карницкий В.В., Тер-Мкртчян Г.Г. Газодизельные автомобили НАМИ // Автомобильная промышленность. - 1993. - № 10. - С. 27-30.
60. Кинетика сажесоборазования из газобразных углеводородов / В.Г. Кнорре, А.И. Прихоженко, А.Я. Дубовицкий, Г.Б. Манелис // Шестой Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву: Сб. материалов. - Черноголовка, 1980. - С. 75-78.
61. 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.
62. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. - М.: Наука, 1974. - 558 с.
63. Кратко А.П., Вихерт М.М., Грудский Ю.Г. Влияние фаз процесса сгорания в дизеле на содержание канцерогенных компонентов в отработавших газах // Автомобильная промышленность. - 1977. - № 6. - С. 9-12.
64. Кратко А.П., Филиппович Т.Р. Перспективы автомобильных газодизелей // Автомобильная промышленность. - 1994. - № 2. - С. 9-10.
65. Крестинин А.В. Кинетическая модель сажесоборазования из ацетилена в разбавленных смесях при температуре выше 1600 К // Химическая физика. - 1987. - Т. 6. - № 3. - С. 342-349.
66. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. - Л.: Недра, 1986. - 280 с.
67. Ксандопуло Г.И. Химия пламени. - М.: Химия, 1980. - 241 с.
68. Ксандопуло Г.И., Дубинин В.В. Химия газофазного горения. - М.: Химия, 1987. - 240 с.
69. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. - Киров: ООО «Фирма «Полекс», 2004. - 231 с.
70. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология смесеобразования в топливном факеле, вырсыскиваемом в метановоздушную среду цилиндра газодизеля // Региональн. науч.-техн. конф. «Наука - производство - технология - экология»: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т.2. - С. 138-140.
71. Кузьмин В.А., Лиханов В.А. Феноменология воспламенения метановоздушной среды в цилиндре газодизеля // Региональн. науч.-техн. конф. «Наука - производство - технология - экология»: Сб. материалов. - Киров, 1998. - Т.2. - С. 140-141.
72. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пос. для высшей школы. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Академический Проект, 2004. - 400 с.

73. Кульчицкий А.Р. К вопросу о расчетном определении эмиссии частиц с отработавшими газами дизелей // Двигателестроение. – 2000. – № 1. – С. 31-38.
74. Кутенев В.П., Свиридов В.Б. Экологические проблемы автомобильного двигателя и пути оптимального решения их // Двигателестроение. – 1990. – № 10. – С. 55-62.
75. Кутенев В.Ф., Звонев В.А., Корнилов Г.С. Научно-технические проблемы улучшения экологических показателей двигателя автотранспорта // Автомобильная промышленность. – 1998. – № 11. – С. 7-11.
76. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива. – М.: Наука, 1971. – 275 с.
77. Лиханов В.А. Использование природного газа в качестве моторного топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. – С.-Петербург – Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. – Вып. 4. – С. 16-21.
78. Лиханов В.А. Мощностные, экономические и токсические показатели дизеля Д-3900 при работе на природном газе // Технические средства для ресурсосберегающих технологий в растениеводстве и животноводстве: Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров, 1997. – С. 210-218.
79. Лиханов В.А. Определение некоторых показателей углеродных комплексов при горении метановоздушной среды в цилиндре газодизеля // Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России: Материалы II Международной науч.-практ. конф.: В 3 т. – Киров, 2000. – Т. 2. – С. 162-165.
80. Лиханов В.А. Основные направления стендовых исследований по переводу на природный газ тракторных дизелей малой размерности // Совершенствование технологий и технологических средств при интенсификации сельскохозяйственных процессов: Тез. докл. науч. конф. ВГСХА. – Киров, 1997. – С. 33-35.
81. Лиханов В.А. Особенности горения дизельного топлива в цилиндре газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА. – Н.-Новгород, 2000. – С. 287-291.
82. 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.
83. Лиханов В.А. Феноменологическая модель горения дизельного топлива, впрынутого в МВС цилиндра газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА. – Н.-Новгород, 2000. – С. 291-297.

84. Лиханов В.А. Химизм высокотемпературного окисления метана при горении в цилиндре газодизеля // Совершенствование процессов механизации и использование энергетики в сельскохозяйственном производстве: Тр. региональн. науч.-практ. конф. НГСХА. – Н.-Новгород, 2000. – С. 297-301.
85. Лиханов В.А. Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей. – Киров: Вятская ГСХА, 2002. – 280 с.
86. Лиханов В.А. Сгорание и сажеобразование в цилиндре газодизеля. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. – 104 с.: ил.
87. 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.
88. 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.
89. 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.
90. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Колос, 1994. – 224 с.: ил.
91. Lihanov V., Lopatin O., Rossohin 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.
92. Ложкин В.Н., Батурын С.А. Об области и характере протекания процесса газификации углеродных частиц применительно к условиям сгорания в дизеле // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Сб. науч. тр. – Барнаул, 1985. – С. 70-83.
93. Лозинский О.К., Атоян К.Н. На газе выгоднее. Технико-экономические показатели газовых автобусов Львовского автобусного завода // Автомобильный транспорт. – 2004. – № 3. – С. 50-51.
94. Лопатин О.П., Россохин А.В., Андрилатов А.А. Рециркуляция отработавших газов как средство снижения токсичности газодизеля 4Ч 11,0/12,5 // XII Туполевские чтения: Материалы Межд. молодежной науч. конф. – Казань: КГТУ, 2004. – Т. 1. – С. 164-165.
95. Лопатин О.П., Россохин А.В., Олейник М.А. Индикаторные диаграммы тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе с рецирку-

- лящей отработавших газов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 104-107.
96. Магарил Р.З. Механизм и кинетика гомогенных термических превращений углеводородов. - М.: Химия, 1970. - 224 с.
97. Максимов Е.А., Плита А.Г., Ефремова Е.А. Зависимость интенсивности лучистого теплопереноса от дисперсного состава продуктов сгорания жидкого топлива // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Киев, 1987. - С. 86.
98. Малов Р.В. Рабочие процессы и экологические качества ДВС // Автомобильная промышленность. - 1992. - № 9. - С. 10-15.
99. Малов Р.В. Механизм воспламенения низкоцетановых дизельных топлив // Автомобильная промышленность. - 1994. - № 10. - С. 11-14.
100. Мальцев В.Н., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. - М.: Химия, 1977. - 320 с.: ил.
101. Мамедова М.Д., Васильев Ю.Н. Транспортные двигатели на газе. - М.: Машиностроение, 1994. - 224 с.
102. Марков В.А. Методы снижения токсичности отработавших газов дизелей транспортного назначения // Известия вузов. Машиностроение. - 1993. - № 10-12. - С. 74-83.
103. 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.
104. Марков В.А., Кислов В.Г., Хватов В.А. Характеристики топливоподачи транспортных дизелей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. - 160 с., ил.
105. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многоцилиндровых и газодизельных двигателей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 296 с.
106. Математическое моделирование процессов сажевыделения и радиационного теплообмена в дизелях / С.А. Батурин, А.С. Лоскутов, В.А. Синицын, В.А. Курочкин // Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС: Сб. науч. тр. ЛПИ. - Л., 1983. - № 394. - С.23-29.
107. Манчуйский Ф.Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи // Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Лаборатория нейтронизации и проблем энергетики автомобилей и тракторов ЦНИТА, 1966. - С. 208-215.
108. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. - Л.: Недра, 1966. - 327 с.
109. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. - Л.: Недра, 1975. - 391 с.
110. Модзалевская М.Л., Блох А.Г. О влиянии спектра размеров частиц са-

- жистого углерода на излучение светящегося пламени // Теплоэнергетика. - 1973. - № 3. - С.63-67.
111. Морев А.И., Плеханов И.П. Устройство и обслуживание газобаллонных автомобилей. - М.: ДОСААФ, 1987. - 141 с.
112. Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей. - М.: Изд-во «Легин-Автодата», 2000. - 80 с.
113. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. - 2002. - № 2. - С. 23-27.
114. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей (продолжение) // Двигателестроение. - 2002. - № 3. - С. 32-34.
115. Обоснование выбора рециркуляции отработавших газов для снижения содержания оксидов азота в отработавших газах газодизеля / 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, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 90-99.
116. Образование и выгорание сажи при сгорании углеводородных топлив / Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полещук, З.Г. Шайхутдинов. - М.: Машиностроение, 1989. - 128 с.
117. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Ред. Н.А. Читыр. - М.: Машиностроение, 1981. - 407 с.
118. Образование сажи при горении гомогенных гексановоздушных смесей при давлениях до 1,5 МПа / Ф.Г. Бакиров, Н.Х. Баширов, В.М. Захаров и др. // Физика горения и взрыва. - 1982. - № 3. - С. 51-56.
119. Образование сажи при термическом разложении ацетилена в условиях ударной трубы / В.Г. Кнорре, В.И. Каменьщиков, А.Г. Ляхов, Д.Т. Снегирева / Физика горения и взрыва. - 1980. - № 2. - С. 89-92.
120. Озимов П.Л., Вагин В.К. Развитие конструкции дизелей с учетом требований экологии // Автомобильная промышленность. - 1998. - № 11. - С. 31-32.
121. Олейник М.А., Россохин А.В. Токсические показатели автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на сжатом 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.
122. Основы горения углеводородных топлив / Под ред. Л.Н. Хитрина. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. - 664 с.: ил.
123. 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.
124. Плита А.Г., Ефремова Е.А. Теплоперенос излучением в двухфазной

- среде, ограниченной изотермическим цилиндром с тороидальной основой // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тр. второго Минского межд. форума по теплообмену. - Минск, 1992. - С. 100-103.
125. Похил П.Ф., Мальцев В.М., Зайцев В.М. Методы исследования процессов горения и детонации. - М.: Наука, 1969. - 296 с.
126. Предводителей А.С., Хитрин Л.Н., Цуханова О.А., Колодцев Х.И., Гроздовский М.К. Горение углевода. - М.: Изд-во АН СССР, 1949. - 234 с.
127. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский. - М.: Недра. - 1986. - 147 с.
128. Прошкин В.И. О химических превращениях в углеводородных топливах при сгорании в дизелях // Двигателестроение. - 1990. - № 2 - С. 58-59.
129. Равкинд А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели. - М.: Недра. - 1976. - 196 с.
130. Радиационный теплообмен в цилиндре дизельного двигателя большой мощности / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, В.А. Асмаловский, В.С. Малияров // Теплообмен излучением и сложный теплообмен: Материалы пятой Всесоюз. конф. по теплообмену. - Минск, 1976. - Т.8. - С. 317-321.
131. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. - Харьков: Высшая школа, 1980. - 169 с.
132. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. Учебник для вузов. - М.: Высш. школа, 1975. - 320 с., ил.
133. Россохин А.В. Влияние различных факторов на дымность отработавших газов дизеля // Тезисы докладов 5-й научной конференции аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 77-79.
134. Россохин А.В. Зональная модель образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 118-125.
135. Россохин А.В. Изменение эффективных и экономических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива // Сборник трудов научно-практ. конф., посвящ. 50-летию Чебоксарского ин-та (фил.) МГОУ. Вып. 3. В 2-х томах. - М.: Изд-во МГОУ, 2005. - Т. 1. - 260 с. (С. 165-166).
136. Россохин А.В. Измерение дымности отработавших газов // Тезисы докладов 5-й научной конференции аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 75-77.
137. Россохин А.В. Особенности процесса образования сажи в цилиндре газодизеля с наддувом // Тезисы докладов 4-й научной конференции аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2004. - С. 104-106.
138. Россохин А.В. Особенности методики проведения стендовых испыта-

- ний по оптимизации процесса сажеобразования 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, 2004. - Вып. 3. - С. 82-86.
139. Россохин А.В. Особенности образования канцерогенных веществ в цилиндре дизеля и газодизеля с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 153-159.
140. 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: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 160-169.
141. 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: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 126-130.
142. Россохин А.В., Девятьяров Р.Р. Эффективные показатели автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе по газодизельному циклу // 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. 210-213.
143. Россохин А.В., Олейник М.А., Рудаков Л.В. Проведение стендовых испытаний автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом // Материалы IV Международной науч.-практ. конф. «Автомобиль и техносфера», Казань, 14-16 июня 2005 г., Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 178.
144. Рябин В.А., Остроумов М.А., Свит Т.Ф. Термодинамические свойства веществ: Справочник. Л.: Химия, 1977. - 392 с.
145. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. - Л.: Машиностроение, 1972. - 224 с. ил.
146. Свиридов Ю.Б., Тихонов Ю.В. Проблемы смесеобразования и сгорания в двигателях с внешним смесеобразованием // Двигателестроение. - 1988. - № 10. - С. 6-8.
147. Серковская Г.С. О канцерогенности нефти и нефтепродуктов // Химия и технология топлив и масел. - 1996. - №1. - С. 39-45.
148. Система АСГА-Т. Руководство по эксплуатации. АПИ 2.950.003РЭ. - Смоленск, 1984. - 81 с.
149. Система АСГА-Т. Нормативные требования. - Смоленск, 1984. - 50 с.

150. Смайлис В.И. Малотоксичные дизели. - Л.: Машиностроение, 1972. - 128 с.
151. Смайлис В.И. Проблемы снижения токсичности и дымности отработавших газов дизелей // Двигателестроение. - 1979. - № 1. - С. 19-21.
152. Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения // Двигателестроение. - 1991. - № 1. - С. 3-6.
153. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 427 с.
154. 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.
155. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1985. - 240 с.
156. 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.
157. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Исследование эмиссионных свойств пламени при импульсном сгорании жидких топлив в замкнутом объеме // Радиационный теплообмен: Тез. докл. пятой Всесоюз. науч.-техн. конф. - Ставрополь, 1982. - С. 126-127.
158. 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.
159. 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.
160. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Лучистый теплообмен при импульсных режимах сгорания // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. респ. конф. - Киев, 1987. - С. 84-85.
161. Страдомский М.В., Васильев Е.П. Радиационный теплообмен и эмиссионные свойства полидисперсной твердой фазы факела при импульсном сжигании жидких топлив // Радиационный и комбинированный теплообмен: Тез. докл. Минского между. форума по тепломассообмену. - Минск, 1988. - С. 27-29.
162. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малайров 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.
163. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малайров В.С. Экспериментальное исследование закономерностей сложного теплообмена при импульсном

- сжигании жидкого топлива в ограниченном объеме // Теплообмен в энергетических процессах и системах: Материалы шестой Всесоюз. конф. по тепломассообмену. - Минск, 1980. - Т. 8. - С. 36-39.
164. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малайров В.С. Исследование граничных условий теплообмена для ИПП дизеля с высоким наддувом // Двигателестроение. - 1980. - № 8. - С. 11-13.
165. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Васильев Е.П. Теплообмен при импульсном сгорании жидких моторных топлив // Двигателестроение. - 1987. - № 11. - С. 5-7.
166. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малайров В.С. Исследование граничных условий теплообмена для ИПП дизеля с высоким наддувом // Двигателестроение. - 1980. - № 8. - С. 11-13.
167. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Малайров В.С. Исследование лучистого теплообмена в цилиндре дизеля // Изв. вузов: Машиностроение, 1982. - № 1. - С. 88-92.
168. Структура сажевых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива в прямой камере сгорания / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремова, В.И. Козленко // Пром. теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 4. - С. 75-78.
169. Структура сажевых частиц при горении распыленного керосина / М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремова, В.Н. Козленко, А.К. Дудченко // Промышленная теплотехника, - 1984. - Т. 6. - № 2. - С. 78-81.
170. Таболин В.В., Сержин А.М. Международный симпозиум «Газовое моторное топливо - топливо будущего» // Автомобильная промышленность. - 1992. - № 6. - С. 28-29.
171. Таран Э.Н. Влияние азотсодержащих соединений на образование сажи при горении // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепрпетровск, 1986. - С. 75-86.
172. Таран Э.Н. Исследование структуры плоских диффузионных пламен на встречных струях спектроскопическими и ионизационными методами // Структура газозафазных пламен: Материалы Всесоюз. семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1984. - Ч. 2. - С. 123-143.
173. Таран Э.Н., Присяжко В.Ф. Влияние внешнего электрического поля на спектр излучения и образование сажи при горении // Структура газозафазных пламен: Материалы между. семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Ч. 3. - С. 183-193.
174. Таран Э.Н., Присяжко В.Ф. О природе саже // Структура газозафазных пламен: Материалы между. семинара по структуре газозафазных пламен. - Новосибирск, 1988. - Ч. 1. - С. 104-113.
175. Таран Э.Н., Шумриков В.В. О структурных особенностях плазмохимического углерода // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. материалов Всесоюз. науч. конф. - Днепрпетровск, 1986. - С. 137-145.
176. 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.
177. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов в газовой фазе. - М.: Химия, 1972. - 128 с.: ил.
178. Теснер П.А. Образование сажи при горении // Физика горения и взрыва. - 1979. - № 2. - С. 3-14.
179. Теснер П.А. Кинетика образования пироуглерода // Химия твердого топлива. - 1983. - № 5. - С. 111-118.
180. Грынов В., Паденко С., Фучкин С. Газодизель для КамАЗов // Автомобильный транспорт. - 1988. - № 11. - С. 39-43; 1989. - № 1. - С. 38-40.
181. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, 1990. - 352 с.
182. Филиппосян Т.Р., Кратко А.П., Мазинг М.В. Пути снижения вредных выбросов отработавшими газами автомобильных двигателей. - М.: НИИ-Навтопром, 1979. - 64 с.
183. Филиппов А.З. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей. - Киев: Вища школа, 1980. - 160 с.
184. Хватов В.Н., Логинов Н.В. Пути снижения дымности отработавших газов дизелей // Двигателестроение. - 1991. - № 5. - С. 42-44.
185. Чертков Я.Б. Моторные топлива. - Новосибирск: Наука, 1987. - 208 с.
186. Шегалов И.Л. Экологическая роль транспортных двигателей // Двигателестроение. - 1986. - № 8. - С. 56-60.
187. Шкаликова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях. - М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. - 64 с.
188. Экспериментальное исследование структуры сажевых частиц в пламени при факельном сжигании жидкого топлива // М.В. Страдомский, Е.А. Максимов, Е.А. Ефремова, А.Г. Плита // Радиационный теплообмен в технике и технологии: Тез. докл. Весенний науч.-техн. конф. - Каунас, 1987. - С. 31-32.
189. 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.
190. Najt Paul M., Foster Favid E. Compression-ignited homogeneous charge combustion // SAE Techn. Pap. Ser. - 1983. - № 830264. - 16 p.
191. Hoche A. Rechnerische und experimentelle Untersuchung von Elementen der Innen-Vorgänge im Dieselmotor // KFT. - 1988. - № 11. - S. 332-335.
192. Few P.C., Newen H.A. Dual fuel combustion in a turbocharged diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. - 1987. - № 871671. - 5 p.
193. Chen T.N., Alford R.N. Combustion characteristics of large gas engines // Pap. ASME. - 1971. - P. 6-8.
194. Silzer participation in ZNG transport systems // Shipp. World and Ship-Build. - 1974. - V.167. - № 3889. - p. 144-146.

195. Daugas M. Pielstick tests on afb biogas diesels give promising results // Mod. Power Syst. - 1983. - № 2. - P. 43-45.
196. 6L G32X marine gas diesel developed by Fuji Diesel // Zosen. - 1982. - № 4. - P. 32-33.
197. Natural gas will fuel bulk carter // Mot. Ship. - 1980. - № 725. - P. 35.
198. Gasmotorenautrüb? // Schiff-Ing. - 1982. - № 161. - P. 41-42.
199. NKK proposes dual fuel diesel LNGC with reliquefaction // Mot. Ship. - 1985. - № 777. - P. 33-35.
200. 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.
201. Ramsey David. Propane for diesel fuel system // Diesel Progr. N.Amer. - 1983. - № 3. - 27 p.
202. 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.
203. 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.
204. Miles J.A. Power unit modification to accommodate interruptible flow of natural gas // Trans. ASAE. - 1977. - № 3. - P. 406-407.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	7
1.1. Социально-экологические аспекты влияния автотракторных двигателей на окружающую среду	7
1.2. Существующие типы газодизелей	16
1.3. Состав отработавших газов дизелей	18
1.4. Физико-химические основы образования сажи в дизелях	19
1.4.1. Физико-химические свойства частиц сажи	20
1.4.2. Теории образования твердой сажистой фазы из углеводородов топлива	23
1.5. Модели образования и выгорания сажи в цилиндре газодизеля	32
2. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫГОРАНИЯ ЧАСТИЦ САЖИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА КПП	35
2.1. Теория процесса образования сажи в газодизеле с турбонаддувом с впрыскиванием запального дизельного топлива в камеру сгорания типа ЦНИДИ	35
2.2. Зонная модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе	39
2.3. Уточненный химизм образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе	45
2.4. Расчетная модель для определения распределения частиц сажи по размерам в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5	57

3. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА	64
3.1. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	63
3.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного УОВТ	66
3.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах	68
3.4. Влияние применения природного газа на эксплуатационные и экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах ..	70
3.4.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах	70
3.4.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах при работе на КПП ..	73
3.5. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения	76
3.6. Влияние применения природного газа на эксплуатационные и экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения ...	77
3.6.1. Влияние применения природного газа на эксплуатационные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения	77
3.6.2. Влияние применения природного газа на экологические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения	81

3.7. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на сажеобразование в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на КПГ	83
3.7.1. Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла поворота коленчатого вала	83
3.7.2. Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	91
3.7.3. Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки	93
3.7.4. Изменение показателей сажеобразования и температуры в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения	95
4. РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АВТОБУСА ПАЗ-32054-12 С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ НА КПГ	97
4.1. Разработка требований к системе дозирования и регулирования подачи природного газа в цилиндры дизеля с турбонаддувом Д-245.12С автобуса ПАЗ-32054-12	97
4.2. Разработка и создание макетного образца автобуса ПАЗ-32054-12 для работы на компримированном природном газе	98
4.3. Оценка экономической эффективности использования природного газа в качестве моторного топлива в дизеле с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5, установленном на автобусе ПАЗ-32054-12	103
ЛИТЕРАТУРА	107

Научное издание

**Лиханов Виталий Анатольевич,
Мохнаткин Виктор Германович,
Россохин Алексей Валерьевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И
ВЫГОРАНИЯ САЖИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ С
ТУРБОНАДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА
ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Монография

Редактор А.В. Зверева

Заказ № 189. Подписано к печати 12.07.2006 г.
Формат 60x84 1/16. Объем усл. печ. л. 7,75. Тираж 500 экз.
Бумага офсетная. Цена договорная. Отпечатано с оригинал-макета.
Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО Вятская ГСХА
610017, г. Киров, Октябрьский проспект, 133