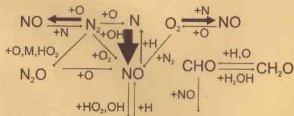


В.А. ЛИХАНОВ, О.П. ЛОПАТИН, В.Г. МОХНАТКИН,
М.А. ОЛЕЙНИК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5
ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Монография



Киров 2006

**В.А. ЛИХАНОВ, О.П. ЛОПАТИН, В.Г. МОХНАТКИН,
М.А. ОЛЕЙНИК**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОАДДУВОМ 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., Лопатин О.П., Мохнаткин В.Г., Олейник М.А. Исследование процессов образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 127 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 содержания оксидов азота в отработавших газах 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 разложения оксидов азота 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.

© В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, В.Г. Мохнаткин, М.А. Олейник, 2006
© ФГОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», 2006

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. АГНКС - автомобильная газонаполнительная компрессорная станция
2. ГД - газодизель
3. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
4. ДТ - дизельное топливо
5. ЕЭК - Европейская экономическая комиссия
6. ЖН - жидкостный нейтрализатор
7. КН - каталитический нейтрализатор
8. КПГ - компримированный природный газ
9. КС - камера сгорания
10. МВС - метановоздушная смесь
11. МВВ - метановоздушный вихрь
12. ОГ - отработавшие газы
13. ПДК - предельно допустимая концентрация
14. ТНВД - топливный насос высокого давления
15. ТПА - топливоподающая аппаратура
16. УОВТ - угол опережения впрыскивания топлива
17. к.п.д. - коэффициент полезного действия
18. в.м.т. - верхняя мертвая точка
19. н.м.т. - нижняя мертвая точка
20. п.к.в. - поворот коленчатого вала
21. NO - оксид азота, %, ppm, г/(кВт·ч)
22. NO_x - оксиды азота, %, ppm, г/(кВт·ч)
23. C_{NO_x} - массовая концентрация оксидов азота, %, ppm, г/м³
24. γ_{NO_x} - объемное содержание оксидов азота, %, ppm, г/(кВт·ч)
25. СО - оксид углерода, %, ppm, г/(кВт·ч)
26. СО₂ - диоксид углерода, %, ppm, г/(кВт·ч)
27. С - сажа, ед. по шкале Bosch
28. СН_x - углеводороды, %, ppm, г/(кВт·ч)
29. РТ - твердые частицы, г/(кВт·ч)
30. p_e - среднее эффективное давление, МПа
31. p_z - давление сгорания в цилиндре, МПа
32. p_{max} - максимальное давление сгорания в цилиндре, МПа
33. p_c - давление конца сжатия, МПа
34. p_{вп} - давление во впускном трубопроводе, МПа

35. $\Theta_{\text{кр}}$ - установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус
36. φ - угол поворота коленчатого вала, градус
37. φ_1 - угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, градус
38. $\varphi_{\text{кр}}$ - угол, соответствующий максимальной температуре цикла, градус
39. $dz/d\varphi$ - относительная скорость активного тепловыделения, $1/\text{градус}$
40. $dp/d\varphi$ - скорость нарастания давления в цилиндре, МПа/градус
41. $t_{\text{вх}}$ - температура впускных газов, $^{\circ}\text{C}$
42. t_1 - температура отработавших газов, $^{\circ}\text{C}$
43. T - осредненная температура цикла в цилиндре, К
44. $T_{\text{ср}}$ - осредненная температура цикла в цилиндре, К
45. n - частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1}
46. N_e - эффективная мощность дизеля, кВт
47. M_e - крутящий момент дизеля, Н·м
48. G_a - часовой расход воздуха, $\text{кг}/\text{ч}$
49. G_f - часовой расход топлива, $\text{кг}/\text{ч}$
50. $G_{\text{диз}}$ - часовой расход запального дизельного топлива, $\text{кг}/\text{ч}$
51. G_p - часовой расход природного газа, $\text{кг}/\text{ч}$
52. g_e - удельный эффективный расход топлива, $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$
53. η_v - коэффициент наполнения
54. α - коэффициент избытка воздуха
55. η_e - эффективный коэффициент полезного действия
56. τ_1 - период задержки воспламенения
57. χ - относительное тепловыделение от сгорания топлива
58. χ_1 - активное тепловыделение
59. ε - степень сжатия

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздуха вредными выбросами автомобильного транспорта в конце XX века стало одной из глобальных экологических проблем. Согласно проведенным исследованиям экологического мониторинга окружающей среды, в ряде регионов России по выбросу загрязняющих веществ в атмосферу на долю автотранспорта приходится свыше 70 % от общего объема загрязнений. Поэтому ухудшение экологической обстановки автомобильным транспортом становится одной из глобальных проблем мирового масштаба. Состояние атмосферного воздуха, от которого зависит климат и биосфера Земли, является определяющим фактором для жизни человека, существования животного и растительного мира, плодородия почвы. Выбросы вредных веществ ведут к изменению климата, парниковому эффекту, все это влечет за собой ухудшение здоровья всех живых существ на Земле. Поэтому проблемы экологии решаются на самом высоком уровне. Так, например, 30 марта 2002 г. Президент России В.В. Путин подписал Постановление Совета Безопасности РФ «О приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники Российской Федерации», среди которых значится экология и рациональное природопользование.

В отработавших газах (ОГ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обнаружено около 280 компонентов, многие из которых токсичны по своим химическим свойствам и характеру воздействия на организм человека. Поэтому эта проблема выявила основные направления по снижению токсичности ОГ автомобильных двигателей. Они включают в себя: совершенствование конструкции двигателей и повышение качества изготовления; использование новых видов топлива нефтяного происхождения, имеющих лучшие экологические показатели; создание энергосиловых установок для автомобилей, выбрасывающих меньшее количество вредных веществ; разработка устройств, снижающих содержание токсичных компонентов в ОГ.

Необходимо заметить, что если среди легкового автотранспорта преимущественную роль занимают бензиновые двигатели, то среди автобусов, грузовых автомобилей, тяжелой техники как промышленного, так и сельскохозяйственного назначения домини-

нирующими являются дизели. И поскольку будущее за дизелями, особый интерес вызывает их совершенствование в плане улучшения эффективных и экологических показателей. Исследования в этом направлении волновали ученых всего мира с давних пор. И на сегодняшний день работы по улучшению эффективных и экологических показателей активно продолжаются. Среди российских ученых исследования в этой области отражены в работах Ахмедова С.А., Варшавского И.Л., Воинова А.Н., Галышева Ю.В., Гетманец Г.В., Туревича Н.А., Долганова К.Е., Драгомирова С.Г., Ермоловича И.В., Жегалина О.И., Звонова В.А., Зельдovich Я.Б., Истомина С.В., Капустина А.А., Кратко А.П., Кульчицкого А.Р., Кутенева В.Ф., Лаврова Н.В., Лиханова В.А., Малова Р.В., Маркова В.А., Матиевского Д.Д., Морозова К.А., Николаенко А. В., Померашцева В.В., Райзера Ю.П., Разлейцева Н.Ф., Саловникова П.А., Сайкина А.М., Саловой Т.Ю., Свиридова Ю.Б., Сигала И.Я., Смайлса В.И., Френкеля А.И., Фурсы В.В., Шатрова Е.В., Шкрабака В.С., Эфроса В.В. и других.

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

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

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду

Околоземная атмосфера загрязняется газообразными, жидкими и твердыми выбросами промышленных предприятий, энергетических установок транспортных двигателей. Из общего количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу крупных городов, большая часть приходится на автомобильный транспорт – 60%, промышленные предприятия выбрасывают 18%, электростанции – 13%, система ТЭЦ – 6% и другие источники – 3%. Следует отметить, что вредные вещества, выбрасываемые производственными предприятиями, концентрируются по огромному радиусу в определенной зоне, а отработавшие газы автомобилей распространяются по всей территории населенного пункта. При этом автомобили загрязняют атмосферу углеводородами и оксидами азота на 90%, оксидами углерода на 30%. При неблагоприятных условиях в приземных слоях атмосферы образуются ядовитые туманы, содержащие токсичные составляющие отработавших газов. Негативное влияние автотранспорта на окружающую среду сказывается не только на населенных пунктах, но и на территориях, непосредственно прилегающих к автодорогам, прежде всего, федерального значения. Уровень загрязнения воздуха вдоль городских автодорог России оксидами углерода (СО) достигает 3...5 ПДК (предельно допустимая концентрация), а оксидами азота (NO_x) 15...25 ПДК. Такая же напряженная экологическая ситуация и в большинстве стран Европы [1...6].

На сегодняшний день весь мировой парк автомобилей насчитывает более 1 млрд. единиц. Большинство из них используют в качестве топлива продукты переработки нефти – бензин и дизельное топливо, в элементарный состав которых входит углерод, водород, в незначительных количествах кислород, азот и сера. Атмосферный воздух являющийся окислителем топлива, состоит, как известно, в основном из азота (79%) и кислорода (около 21%). При идеальном сгорании стехиометрической смеси углеводородного топлива с воздухом в продуктах сгорания должны

присутствовать N_2 , CO_2 , H_2O . В реальных условиях ОГ содержат также продукты неполного сгорания (оксид углерода, альдегиды, твердые частицы углерода, перекисные соединения, водород и избыточный кислород), продукты термических реакций взаимодействия азота с кислородом (оксиды азота), а также неорганические соединения тех или иных веществ, присутствующих в топливе (сернистый ангидрид, соединения свинца и т.д.) [7...10].

Сжигание топливовоздушной смеси в цилиндре ДВС в условиях высоких температур при локальном или общем недостатке окислителя в смеси приводит к значительному загрязнению природной среды токсичными веществами и сажей. Вред, наносимый экологической системе загрязняющими веществами, может быть обусловлен изменением концентрации компонентов газа в атмосфере и накоплением в ней частиц и химически активных веществ [4]. Этот вред может быть прямым, т.е. выражаться в изменении жизненных процессов, вызванных токсичными газами, нарушением частицами дыхания растений, а также в коррозии металла и загрязнением питьевой воды химическими реагентами. Кроме прямых последствий загрязнения имеется много столь же вредных косвенных, например, образование смога вследствие фотохимической реакции и усиление образования тумана, а также выпадение дождя из-за присутствия частиц. Когда тепло выделяется в больших количествах, происходит изменение локальных температурных градиентов, вызывая инверсию воздушных слоев в городах, не говоря уже о том, что относительно небольшие изменения температуры воды и воздуха могут быть вредны для жизненных систем, чувствительных к температуре.

Такое положение в плане экологической безопасности заставило промышленно развитые страны ввести законодательные акты на содержание токсичных компонентов в ОГ транспортных средств и установок, оснащенных ДВС. При этом разработка и совершенствование норм ведется не только по национальным проектам, но и по международным программам. Экологические требования к автомобилю и его двигателю являются в настоящее время приоритетными. Экологическая чистота отработавших газов закладывается в конструкцию двигателя и автомобиля в целом еще на стадии проектирования. И в дальнейшем во время эксплуатации характеристики токсичности должны оставаться

стабильными. На основании этого разработаны нормы (табл.1.1), регламентирующие содержание токсичных компонентов в ОГ новых автомобилей, выпускаемых на автомобильных конcernах большинства развитых стран [12]. С каждым годом эти нормы ужесточаются, а по плану ЕЭК ООН к 2017 году эмиссия отработавших газов ДВС должна максимально приблизиться к нулю.

Таблица 1.1 - Предельное содержание токсичных компонентов в отработавших газах бензиновых и дизельных двигателей

Нормы	Год введения	CO, г/кВт·ч	HC, г/кВт·ч	NO _x , г/кВт·ч	Твердые частицы, г/кВт·ч	Дымность, мг/м ³
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 связи с этим возникает необходимость использования других источников энергии, но на сегодняшний день более 90 % мощностей всех установленных энергетических агрегатов на Земле приходится на двигатели внутреннего сгорания. Поэтому необходимо серьезно задуматься о путях совершенствования ДВС. Останется ДВС основным источником энергии в 21 веке или нет, зависит, прежде всего, от того, насколько значительными будут достижения в совершенствовании двигателей в плане повышения топливной экономичности и снижения вредных выбросов, то есть насколько успешно будет решена проблема создания экономичного и малотоксичного двигателя. В связи с этим можно предположить, что будущее за дизелями, поскольку они изначально имеют меньшую эквивалентную токсичность и высокую топливную экономичность [12...14].

Оксиды азота являются наиболее токсичными среди всех загрязняющих химических соединений, содержащихся в ОГ дизе-

лей. Они образуются в процессе горения, главным образом, как результат химических реакций атмосферного кислорода и азота. Оксиды азота, взаимодействуя с парами воды в воздухе, образуют азотную кислоту, которая разрушает легочную ткань, вызывая хронические заболевания. При хроническом отравлении наблюдаются воспалительные заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, мышечная и сердечная слабость, нервные расстройства. Поглощая естественную фоновую радиацию в ультрафиолетовых и видимых частях спектра, оксиды азота снижают прозрачность атмосферы и участвуют в образовании фотохимического тумана – смога, состоящего из фотохимических оксидантов и озона. В отработавших газах двигателей содержится в основном оксид и диоксид азота [15].

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

1.2. Методы снижения содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей

Снижение вредных выбросов двигателями внутреннего сгорания представляет собой многогранную и порой противоречивую проблему, решение которой связано с совершенствованием рабочих процессов, технического обслуживания, развитием систем нейтрализации отработавших газов [16...21].

Проблемой снижения содержания оксидов азота в ОГ дизелей серьезно занялись в последние десять лет. Связано это было с тем, что нормы, регламентирующие предельно допустимые концентрации, либо отсутствовали, либо на них были высокие допуски, что позволяло не учитывать содержание токсичных компонентов, в частности оксидов азота.

На сегодняшний день известно много технических решений и методов снижения содержания оксидов азота в ОГ дизелей:

- совершенствование конструкции дизелей и точная регулировка параметров;
- изменение угла опережения впрыскивания топлива;
- изменение степени сжатия;
- изменение параметров наддувочного воздуха и коэффициента избытка воздуха;
- повышение давления впрыскивания топлива;
- применение каталитических нейтрализаторов и других средств очистки ОГ;
- использование рециркуляции ОГ;
- подача воды на впуске;
- замена воздуха кислородом;
- изменение рабочего процесса, состава и организации подачи топлива;
- применение присадок к топливу;
- применение других видов топлив.

Перечисленные методы можно разделить на три группы организации действий по снижению содержания оксидов азота: 1-я группа – очистка продуктов сгорания от оксидов азота, 2-я группа – уменьшение образования оксидов азота за счет конструктивных изменений и регулировок двигателя, 3-я группа – изменение состава и вида топлива с изменением процесса сгорания. При этом не все методы экономически обоснованы и целесообразны, некоторые из них можно применять только на стационарных установках. Отсюда и массовость поисков альтернативных решений.

Современные комплексные системы очистки отработавших газов для дизелей состоят из каталитических и жидкостных нейтрализаторов, а также сажевых фильтров. Их ресурс ограничен, а стоимость высока из-за использования катализаторов на основе благородных металлов и увеличения расхода топлива вследствие роста противодавления выпуску ОГ.

Снижение выброса оксидов азота в атмосферу с ОГ дизелей может быть достигнуто за счет использования малотоксичных рабочих процессов.

Фирмой Toyota разработан рабочий процесс «Duotherm», особенностью которого является впрыскивание топлива с помощью одноопловой или штифтовой форсунки в центр ассимет-

ричной КС, имеющей сферическую форму с подрезанной верхней частью. Процесс отличается очень низким содержанием NO_x в ОГ [22].

Шведская фирма Munters Euroform с целью снижения эмиссии NO_x в отработавших газах внедрила систему для судового дизеля, называемую «Humid Air Motor» («Двигатель с увлажненным воздухом»), где насыщение воздуха парами также осуществляется в специальном контейнере увлажнения воздуха, после которого воздух с относительной влажностью 99 % поступает в дизель [23]. В результате испытаний системы «Humid Air Motor» на судовом дизеле установлено: уменьшение эмиссии оксидов азота NO_x на 70...80 %; незначительное влияние системы на расход топлива ($\pm 0,5\%$); уменьшение температуры ОГ ($\geq 20^\circ\text{C}$); снижение температуры выпускных клапанов ($\geq 20^\circ\text{C}$); отсутствие воды в системе смазки; отсутствие следов коррозии на деталях цилиндропоршневой группы.

Существует новое поколение российских автомобильных дизелей КамАЗ (КамАЗ-7403.10-01), которые по уровню токсичности отработавших газов вполне соответствуют современным и перспективным нормам отечественных и международных стандартов [24]. Хотя такие экологические характеристики обеспечены, в общем, традиционными средствами: уменьшением угла опережения впрыскивания топлива, изменением характеристик муфты опережения впрыскивания, уменьшением цикловой подачи на 23 % и объема подыгольного пространства форсунки.

Шведская фирма Saab и австралийская фирма Orbital предложили свой способ комплексного снижения токсичных компонентов, в частности оксидов азота, и улучшения экономических показателей [25]. Ими была разработана система «SCC - Saab Combustion Control», которая позволяет экономить как утверждают разработчики, до 10 % топлива, а показатели концентрации CO_2 и CH в отработавших газах могут быть снижены практически вдвое, NO_x – на 75 %. Принцип работы заключается в том, что горение воздушно-топливной смеси происходит без нарушения ее стехиометрического состава (отношение воздуха к топливу = 14,6:1), а для нейтрализации продуктов сгорания достаточно обычного трехкомпонентного каталитического нейтрализатора отработавших газов.

Кроме того, здесь нашли применение изменяемые фазы газораспределения и изменения угла опережения впрыскивания топлива. При одинаковых «временных» значениях (по отношению к обычному двигателю) открытия выпускных и выпускных клапанов (230 градусов поворота коленчатого вала) существенно увеличена зона их перекрытия. Впрыск топлива в цилиндр происходит значительно раньше, в начале зоны перекрытия клапанов. Дополнительная порция воздуха впрыскивается в процессе такта сжатия, чем обеспечиваются завихрение и интенсивное перемешивание компонентов рабочей смеси.

Модификация процессов сгорания обходится в пределах 2,5...16,3 долл./кВт в ценах 2005 года, и при этом эффективность снижения NO_x может достигать 25...37 % [26]. По этому пути пошли фирмы: «Изудузу», «Хино», «Мицубиси» (Япония), «Перкинс» (Великобритания), «Катерпиллер», «Камминс» (США) и другие [27]. Основной недостаток малотоксичных рабочих процессов с точки зрения снижения выброса оксидов азота – усложнение конструкции, что увеличивает себестоимость дизеля.

Одним из способов снижения содержания оксидов азота является метод рециркуляции отработавших газов. Он широко используется на судовых дизелях, где есть возможность охлаждать рециркулируемые газы. На современных автомобильных дизелях рециркуляцию применяют только в комплексе с другими средствами очистки ОГ, такими как сажевые фильтры, каталитические нейтрализаторы, лямбда-зонды [28...30].

Существующие устройства рециркуляции отработавших газов при использовании не дают того эффекта, на который они рассчитаны. Дело в том, что при впрыске отработавших газов в первичный воздух дизеля возникает нарушение дозировки количества перепускаемых газов, в результате чего повышается удельный расход топлива, снижается мощность, увеличивается содержание углеводородов и сажи. Происходит это по причине разрегулировки устройства из-за большого количества сопряженных деталей, что определяет сложность и дороговизну изготовления подобных устройств, а также низкую надежность конструкции, и негативного влияния на них высокотемпературных отработавших газов. Последнее обстоятельство приводит к нарушению первоначально установленных параметров регулировки, а

сложность конструкции является причиной повышенных затрат при обслуживании. Кроме того, при эксплуатации подобных устройств обязательна периодическая доводка, которая предусматривает необходимость наличия специального дополнительного стенового оборудования для обеспечения точности ее проведения, что в итоге повышает общие затраты.

Одним из способов снижения содержания оксидов азота в ОГ дизеля является впрыскивание водотопливных эмульсий (ВТЭ).

Так, на базе Кубанского ГАУ были проведены испытания на дизельном двигателе ПИЛСТИК 8 РАЧ-185 мощностью 750 кВт, который был установлен на карьерном самосвале БелАЗ-7519. В условиях горно-обогатительного комбината испытания показали снижение дымности на 61 %, токсичности по оксидам азота NO_x в 3...4 раза, по оксидам углерода CO в 8...10 раз, по формальдегиду в 3...4 раза [31]. Снижения дымности, токсичности отработавших газов и увеличение экономичности работы двигателя достигается за счет впрыскивания в камеру сгорания высокодисперсных водотопливных эмульсий. Минус данной разработки в том, что способы создания эмульсий с использованием электроимпульсных явлений, ультразвуковых колебаний, вибраций, высокооборотных перемешиваний и т.п. имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение на транспортных объектах (судах, автомобилях): большие удельные затраты энергии на создание достаточно тонких эмульсий, малая производительность, повышенное тепловыделение, недолговечность.

В этом же направлении провели исследования ЦНИДИ и «Эко-нейтраль». Испытания на двигателях 6Ч 15/18 и 6Ч 18/22 показали, что при работе двигателей на ВТЭ (содержание воды в топливе 15...40 %) в результате улучшения полноты сгорания дымность ОГ снижается в 2...3 раза и на 20...30 % уменьшаются выбросы оксидов азота [32]. Однако на холостом ходу и при малых нагрузках дизеля применение ВТЭ создает совоккупный отрицательный эффект. Также эти системы сложны, дорогостоящи (до 15 % стоимости силовой установки) и крупногабаритны, что затрудняет их размещение на автомобиле.

В связи с истощающимися запасами нефти все больше научных разработок по снижению токсичности отработавших газов,

в частности оксидов азота, проводится по использованию альтернативных видов топлива, таких как водород, спирты и природный газ [33...36].

Канадская компания Cummins Westport Inc., американская SunLine Transit Agency и голландская DAF провели дорожные испытания двух пилотных автобусов, оснащенных восьмидицильными дизелями с турбонаддувом CF85.380 и CF85.430 и работающими на водородно-метановой смеси «вотан» (водород + метан) [37]. Цель проекта заключалась в сравнении экологических характеристик различных видов газового топлива и, прежде всего, их влияние на парниковый эффект. Проведенные испытания «вотана» (объемное соотношение: 20 % водород и 80 % метан) показали снижение содержания оксидов азота в отработавших газах на 28 % и уменьшение уровня шума без какого-либо ущерба рабочим характеристикам двигателя.

Фирма Ballard Power System предложила свой способ снижения содержания оксидов азота в дизелях с помощью водорода [38]. Суть проекта заключается в улучшении процесса сгорания топлива в ДВС путем добавки к традиционному топливу (дизельное топливо, природный газ) водородосодержащего синтез-газа, получаемого непосредственно на борту автомобиля из углеводородного топлива с помощью генератора синтез-газа. Такой подход предполагается применить к эксплуатируемым и вновь создаваемым автомобилям. Разработка и создание бортовых устройств получения синтез-газа и массовое внедрение их в практику, в первую очередь установка на парк эксплуатируемых автомобилей, дали бы ощутимый эффект в повышении топливной экономичности и улучшении экологических характеристик автомобилей. Связано это с тем, что водород обладает высокой экологической чистотой и является топливом для ДВС и двигательных энергоустановок на базе низкотемпературных (твердополимерных и щелочных) топливных элементов.

Проблема внедрения любых проектов, связанных с водородом, – это сложность хранения водорода на борту автомобиля. Низкая энергоплотность водорода по объемной теплопроизводительности уступает большинству жидких и газообразных топлив. Общеизвестно, что хранение водорода на борту любого транспортного средства является крайне нерациональным из-за боль-

шой массы и габаритов контейнера и его взрывоопасности [39]. Поэтому необходимо иметь на борту автомобиля установки, позволяющие вырабатывать водород из углеводородных топлив. Прямое сжигание водорода в ДВС по КПД и экологическим характеристикам уступает варианту применения водорода в топливных элементах. Затраты на выпуск экологически чистых автомобилей, способных работать на водородных элементах, превышают на сегодняшний день желаемые в 8...15 раз.

Наиболее перспективным на сегодняшний день альтернативным видом топлива считается сжатый природный газ [40...43]. Следует особо отметить, что природный газ является экологически чистым видом топлива, и его ресурсы не зависят от запасов нефти. По суммарной экологической опасности газовые топлива во много раз превосходят бензин и дизельное топливо. Приоритетность природного газа как наиболее перспективного, экологически чистого моторного топлива очевидна для многих стран мира. В Канаде, Новой Зеландии, Аргентине, Италии, Голландии, Франции и других странах успешно действуют национальные программы перевода автотранспорта, в первую очередь городского, на газомоторное топливо. Для этого разработаны соответствующие нормативно-законодательные базы: ценовая, налоговая, тарифная, кредитная. В результате налицо явный прогресс. В Нидерландах более 50 % всего автотранспорта используют в качестве топлива газ, в Италии – более 20 %, автобусные парки Вены и Дании на 95 % и 87 %, соответственно [44]. В странах Западной Европы для стимулирования газификации автотранспорта предусматривается существенное уменьшение налогов на автомобили, использующие газовое топливо. В среднем эта разница составляет 1,5...2 раза. Кроме того, автоводители после конверсии автомобиля освобождаются от налоговых выплат на 3 года. С 1996 года в Великобритании и Франции существенно уменьшены налоги на автомобили, использующие газовое топливо. В Германии эта разница составляет 1,5 раза, в Нидерландах – 1,7 раза.

ОАО «КамАЗ» внедряет в производство двигателя с турбонадувом КамАЗ – 7403.10, работающие по газодизельному циклу, которые по содержанию оксидов азота соответствуют нормам Евро-2 [45].

ООО «МОБИЛГАЗ» занимается переоборудованием автомобилей различной модификации для работы по газодизельному циклу [46, 47]. Работоспособность этих автомобилей подтвердилась в различных условиях эксплуатации. Испытания показали снижение NO_x в отработавших газах на 10...15 % в зависимости от модели двигателя.

На базе ФГОУ ВПО Вятская ГСХА были разработаны системы регулирования подачи газа при работе по газодизельному процессу дизелей: 3Ч 9,5/10,0; 2Ч 10,5/12,0; 4Ч 10,5/12,0; 4Ч 9,85/12,7; 4Ч 11,0/12,5. Отбор проб отработавших газов при работе по газодизельному циклу показал снижение содержания NO_x на различных режимах до 18 % [48...55].

Из приведенного материала следует, что наиболее эффективным и экономически оправданным методом снижения содержания оксидов азота в ОГ дизелей является перевод двигателя на газодизельный цикл. Это позволит снизить содержание NO_x с одновременным уменьшением всего спектра токсичных компонентов, а также улучшить эффективные и экономические показатели работы двигателя.

1.3. Образование оксидов азота при сгорании природного газа и дизельного топлива в дизелях с турбонадувом

Оксид азота NO образуется во время горения в камере сгорания в различных концентрациях. Цепные реакции начинаются с появления атомарного кислорода, который образуется вследствие диссоциации молекул кислорода при высоких температурах, достигаемых в процессе горения [60...62]. В соответствии с этим механизмом атомы азота не начинают цепной реакции, так как их равновесная концентрация во время горения относительно низка по сравнению с равновесной концентрацией атомарного кислорода. Поэтому при горении в дизеле локальное образование NO в струе связано с локальной концентрацией атомов кислорода. Эта концентрация зависит от концентрации кислорода и локальной температуры.

В дизелях во время хода сжатия NO не образуется даже в двигателях с очень высоким наддувом из-за относительно низкой

достигаемой температуры [63...65]. Хотя NO не образуется в зонах бедного срыва пламени на ранних стадиях горения, повышенные температуры воздуха может вызвать горение в этих зонах и образование NO позднее в цикле работы, после того как сгорит остальная часть струи.

Скорость образования NO больше в пламени богатых смесей, чем в стехиометрических или бедных [66]. Однако окончательная концентрация максимальна для смесей, которые несколько беднее стехиометрической. Зоны горения бедной смеси являются одними из главных зон образования NO, поскольку эта часть струи сгорает первой и имеет наибольшее время пребывания в послепламенной зоне.

Повышение температуры вследствие горения в ядре и на стенках может увеличивать образование NO двумя путями. Во-первых, увеличение средней температуры в цилиндре, приводящее к повышению концентрации NO в зонах горения бедной смеси и бедного срыва пламени, а также в оставшемся воздухе. Во-вторых, это может привести к очень высокой температуре пламени в ядре. Количество NO, образующегося в ядре, зависит от локальной концентрации кислорода. Например, если концентрация кислорода в ядре увеличивается, как при подаче топлива через большее число сопел, количество NO, образовавшейся в ядре, увеличивается [67].

При снижении температуры во время хода расширения концентрация NO не снижается до равновесной концентрации. Как установлено, в поршневых двигателях процессе исчезновения NO в ходе расширения очень медленный, поэтому концентрация NO в этом ходе, по существу, не меняется [68]. В наибольшей степени это относится к горению бедных смесей [69]. Поэтому увеличение отношения топливо – воздух приводит к увеличению максимальной среднemasовой температуры газа, о чем свидетельствует повышение максимального давления и температуры отработавших газов. Увеличение максимальной среднemasовой температуры газа не сопровождается соответствующим увеличением количества NO. Этим подтверждается тот факт, что эмиссия NO двигателями с непосредственным впрыском и турбонаддувом главным образом связана с горением в зонах бедной смеси; кроме того, концентрация NO, обусловленная последующим горением

топлива в ядре и на стенках, может и не быть основным источником образования NO.

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

1.3.1. Образование термических оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

Сложность при изучении горения топливовоздушной смеси в камере сгорания дизеля заключается в том, что самые распространенные вещества, такие как природный газ и дизельное топливо, включают в себя довольно много разнообразных веществ. Если сначала удавалось обнаружить только конечные продукты сгорания, то сегодня с помощью современных методов анализа можно выявить промежуточные соединения, свидетельствующие о том, что горение – это сложная система молекулярных реакций [70].

С научной точки зрения цель состоит в том, чтобы узнать, какие элементарные реакции способствуют увеличению и какие – уменьшению содержания примесей в продуктах сгорания. Наиболее понятным процессом возникновения вредных примесей при горении является образование оксидов азота с общей формулой NO_x , в очень горячих пламенах (при температурах более 2000 К). Считается, что единственным оксидом азота, образующимся непосредственно в пламенах, является NO. Диоксид азота (NO_2) появляется позже в результате медленной реакции монооксида азота с атмосферным кислородом, которая может идти даже при комнатной температуре [71]. В очень горячих пламенах молекулярный азот воздуха теряет свою инертность и расщепляется атомами кислорода по реакции



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



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



Условия образования оксидов при горении до сих пор не разработаны в достаточной мере и требуют глубокой проработки весьма сложной химической кинетики процесса в сочетании с детальным изучением теплообмена и его влияния на кинетику [71]. В большинстве публикаций в качестве основной модели образования NO припималась «термическая» схема. Согласно этой схеме выход NO определяется реакцией между атомом кислорода и молекулой азота. При этом количество атомарного кислорода определяется диссоциацией молекулы O_2 . В условиях высокотемпературного горения азот воздуха переходит в реакционноспособное состояние и соединяется с кислородом, образуя оксиды NO , NO_2 и N_2O . Основная доля при этом приходится на NO [72].

Энергетический барьер этой реакции складывается из двух составляющих:

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

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

Таким образом,

$$E = E_1 + E_2 = 494/2 + 314 = 561 \text{ кДж/моль}. \quad (1.5)$$

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

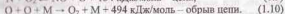
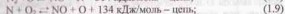
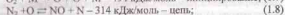
Так как энергия активации этой реакции очень высока, то она предопределяет исключительно сильную зависимость скоро-

сти образования оксидов азота от температуры:

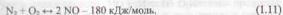
$$dC_{NO} / dt = 2 K_N C_O C_{N_2}, \quad (1.6)$$

где K_N – константа скорости реакции, %; C_O и C_{N_2} – концентрации атомарного кислорода и молекулярного азота, % [73].

Образование кислорода в KC при горении происходит не только за счет диссоциации O_2 , но и в ряде других реакций, концентрация атомарного кислорода в зоне горения на 1-2 порядка выше равновесного, определяемого из условий диссоциации молекулярного кислорода, и в пламенах углеводородов составляет 0,4...0,8 %:



Формальная кинетика условий протекания цепной реакции окисления атмосферного азота свободным кислородом при горении описывается уравнением



В работах Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменцкого, Ю.П. Райзера показано, что, несмотря на цепной механизм реакции образования оксидов азота, ее формальная кинетика достаточно хорошо описывается уравнением обратимой реакции (1.11) с энергией активации для прямой реакции E_1 и обратной E_2 . В результате получено уравнение для равновесного количества NO [74]:

$$[C_{NO}] = 4,6 \sqrt{C_{O_2} C_{N_2}} \exp\{-21500/(RT)\}. \quad (1.12)$$

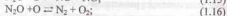
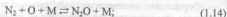
Концентрация атомарного кислорода в пламенах может быть определена экспериментально с использованием спектраль-

ных методов или расчетным путем. Согласно расчетам Я.Б. Зельдовича, при горении с избытком окислителя

$$Co = |K| \sqrt{Co_2} \quad (1.13)$$

где Co_2 — концентрация кислорода в продуктах сгорания, %; $|K|$ — константа равновесия (%/с)². Так как $|K|$ сильно зависит от температуры, то, следовательно, концентрация атомарного кислорода и зависящий от нее выход оксида азота обусловлены максимальной температурой в зоне горения.

Так же стоит отметить, что концентрация оксидов азота линейно увеличивается с увеличением концентрации атомарного кислорода и экспоненциально с увеличением температуры [75]. Однако, согласно работам С.П. Фенимора, П.С. Мальте, зависимость выхода O и O_2 по формуле (1.13) не имеет места. По их мнению, при зажигании бедных смесей NO образуется во влажном турбулизованном потоке через гемьюксид азота N_2O :



При стационарном режиме горения реакция горения и следующая за ней реакция образования оксида азота протекает при переменной температуре. При анализе процесса в работах Ю.П. Райзера за характерную температуру принята максимальная температура [76].

П.Я. Садовниковым была разработана математическая теория синтеза азота в условиях переменной температуры [77]. Получены решения для двух крайних случаев подвижности реакций: а) малой подвижности, когда в зоне горения не успевает образовываться равновесная концентрация оксида азота и реакция останавливается при малом выходе вследствие охлаждения; б) большой подвижности, когда в процессе горения достигается равновесная концентрация, но реакция остается подвижной, и далее при охлаждении концентрация оксида азота падает в резуль-

тате его разложения.

Мерой подвижности реакции является безразмерный критерий, составленный из константы скорости обратной реакции — K_p , равновесной концентрации — $[C_{NO}]_r$ и времени реакции — τ_p :

$$K_p [C_{NO}]_r \tau_p$$

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

$$C_{NO} = C_{NO} / [C_{NO}]_r = K_p [C_{NO}]_r \tau_p \quad (1.18)$$

Используя характерное время установления равновесной концентрации τ_{NO} , приведенное Ю.И. Райзером, получим критерий подвижности реакции:

$$K_p [C_{NO}]_r \tau_p = \tau_p / [C_{NO}]. \quad (1.19)$$

Вследствие значительного энергетического барьера реакции (1.15) можно считать, что образование основного количества оксида азота, определяющего концентрацию в конечных продуктах сгорания, происходит при максимальной температуре и остается существенным на некотором температурном интервале, так называемой температурной ступеньке. За данную величину целесообразно принять введенную Л. А. Франк-Каменским единицу температуры, соответствующую изменению скорости реакции [78]:

$$RT_{max}^2 / E - \Delta T, \quad (1.20)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

В этом случае время реакции рассматривается как интервал Δt , в течение которого поддерживается температурная ступенька.

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

Подробное рассмотрение позволило отметить следующее:

1) время пребывания реагентов в зоне максимальных температур в камере сгорания обычно ниже равновесного;

2) в пламени имеется сверхравновесная концентрация атомарного кислорода;

3) температура в ядре зоны горения существенно ниже теоретической из-за повышенного расхода теплоты на неравновесную диссоциацию и наличия теплообмена излучением и турбулентных пульсаций;

4) время реакции всегда меньше времени образования равновесной концентрации. Поэтому количество образовавшегося в зоне горения оксида азота всегда меньше равновесных значений.

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

С.П. Фенимор [79] предположил, что в углеводородных пламенах велика вероятность столкновения радикалов CH с молекулами азота, а также при использовании реакции (1.22) возможно возникновение радикала N:



Также возможен механизм окисления N_2 через радикалы OH, требующие тройного столкновения [80]:



Расчет образования оксидов азота в КС дизеля используют не только цепной механизм Я.Б. Зельдовича, но и различные кинетические механизмы которые учитывают другие реакции бимолекулярного механизма. В результате чего достигается совпадение опытных и расчетных концентраций оксида азота.

По проведенному анализу образования термических оксидов азота можно установить следующее.

1. Окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания.

2. Выход NO определяется максимальной температурой сгорания, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции (при отсутствии в топливе азота).

3. Окисление азота происходит по цепному механизму взаимодействия атомов и молекул азота и кислорода.

4. Выход NO зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания.

5. Неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания значительно влияет на выход NO.

6. При температурах ниже 2000 К образование NO происходит с участием активных центров, таких как CN, HCN, NH, NH_2 , C_2 и др. Выбор конкретной кинетической схемы протекания процесса определяется физическими условиями, видом топлива и составом смеси.

1.3.2. Образование оксидов азота из геммоксида азота в процессе горения углеводородных топлив

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



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

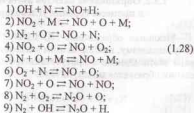


Очень часто эту реакцию не учитывают, поскольку она обычно дает незначительный вклад в полный выход NO. Однако в условиях бедной смеси образование радикалов CH может быть подавлено, и, следовательно, по механизму С.П. Фенимора образуется меньше NO, а низкие температуры подавляют обра-

зование NO по механизму Я.Б. Зельдовича. Остается только образование NO из N_2O , которое прототируется высоким давлением из-за тримолекулярной реакции и, как это обычно свойственно тримолекулярным реакциям, имеет низкую энергию активации. Поэтому низкие температуры не снижают его скорость так сильно, как в случае механизма Я.Б. Зельдовича. Все указанные обстоятельства приводят к тому, что путь образования NO через образование N_2O является основным источником NO при горении бедных предварительно перемешанных смесей и в двигателях при использовании природного газа [84].

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

В работе [85] установлено, что в КС дизеля в зонах максимальных температур образуется только NO, а реакций с образованием NO_2 практически нет и их можно не учитывать, а при тройном соударении частиц M может быть любая молекула, необходимая для отвода энергии:



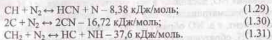
Итоговая концентрация NO на много порядков выше суммы концентрации всех азотосодержащих веществ. К тому моменту, когда горение метана уже практически закончилось, в системе присутствует лишь 13 % от общего количества NO.

1.3.3. Образование быстрых оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

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

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

С.П. Фенимор [86] на основании анализа ряда реакций сделал предположение, что быстрое образование NO объясняется связыванием молекул азота радикалами CH и C_2 в реакциях с очень малыми энергетическими затратами:



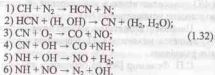
Следует отметить, что измеренные в зонах факела концентрации HCN подтверждают возможность образования некоторого количества NO с участием данных реакций [87].

Исследования, проведенные Ю.Б. Хомером и М.М. Саттопом [88] при горении бедных метановоздушных пламен, показали, что при расчетном выходе NO (3...5 ppm) фактический выход NO пламени составляет 40...50 ppm.

В работах Ф. Бахмайера, Т. Миачи и соавторов [89] также отмечались высокие концентрации HCN пламенах. В результате работы было показано, что решающую роль в окислении N_2 в зоне горения играет радикал CH_2 , а в исследовании [90] было установлено, что количественный выход NO при горении углеводородных газов (метан, пропан, бутан) пропорционален количеству CH независимо от значений α . Образующиеся по этому механизму оксиды азота обнаруживаются в начале зоны горения ламинарных пламен (или в корне турбулентного факела), что свидетельствует о малом времени их образования. В связи с этим

тельствует о малом времени их образования. В связи с этим их и называют «быстрыми» NO.

В работе Р. Гарриса и соавторов [91] при горении смеси $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$ (при изменении концентрации кислорода от 33,3 до 80 %) вблизи зоны горения неизменно фиксировались сверхравновесные концентрации OH. Для объяснения образования NO в зоне горения авторами предложена следующая схема:



Дополнительный механизм быстрого образования NO во фронте пламени более сложный, чем механизм термического образования NO, поскольку в нем участвуют радикалы CH, которые ранее рассматривались как несущественный промежуточный компонент, т.е. NO образуется по сложной схеме реакций. Радикалы CH, образующиеся как промежуточные компоненты только во фронте пламени, реагируют с азотом воздуха с образованием циановодородной кислоты, которая далее реагирует с образованием NO [92].

В работах В.Н. Крыжановского и И.Я. Сигала проведены исследования образования NO в предварительно подготовленных метановоздушных пламенах при различных α . Было определено, что время образования оксидов азота в начале зоны горения мало, и эта часть образовавшегося NO с должным основанием причислена к быстрым оксидам азота.

В исследовании [93] экспериментально была определена скорость образования «быстрых» и «термических» NO во фронте ламинарного пламени. Для оксидов азота, образующихся по термическому механизму, средняя скорость образования для смеси $T_0 = 293 \text{ K}$, $\alpha = 1,10$ составляла:

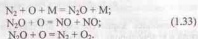
$$W_{\text{терм}} = (17 - 22) \cdot 10^3 \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

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

$$W_{\text{быстр}} = (10 - 35) \cdot 10^4 \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Как видно, скорость образования «быстрых» NO на порядок выше. При повышении температуры смеси от 293 до 543 К выход «термических» и «быстрых» NO трудно разграничить. Как среднее время образования оксидов азота, так и средняя скорость образования по глубине фронта горения изменяются незначительно. С увеличением температуры скорость образования «быстрых» NO, не увеличивается, а даже снижается, что еще раз подтверждает данные о более высоком содержании O и OH в пламенах при сравнительно низких температурах горения [94].

Образование «быстрых» NO можно представить другой схемой [95]:



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

На рис 1.1 показано образование NO при горении метана в реакторе смешения. Расчеты выполнены для чисто термического и полного механизмов (механизмов Я.Б. Зельдовича и С.П. Фенимора), так что разницу между концентрацией NO, образованной по термическому механизму, и полной концентрацией NO можно отнести на счет механизма быстрого образования NO [84].

Также анализ работ, проведенных Н.А. Гуревичем, В.Г. Ляскоронским, И.Я. Сигалом, позволяет отметить, что быстрое образование оксида азота во фронте пламени — явление, органически связанное с горением и присущее пламенам углеводородов и углесодержащих топлив. Быстрое окисление азота во фронте пламени является достоверным и надежно установленным фактом. Явление хорошо воспроизводится в лабораторных условиях

независимо от разнообразия используемых для его наблюдения горелочных устройств и типов пламени.

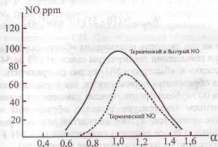


Рисунок 1.1 - Образование NO в реакторе смешения в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Наиболее характерными признаками быстрого окисления азота в углеводородных пламенах служат:

- а) кратковременность процесса, в результате чего зона образования NO локализована на сравнительно небольшом участке фронта ламинарного пламени;
- б) слабая зависимость выхода NO от температуры горения;
- в) сильная зависимость выхода NO от соотношения топливо-воздух;

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

1.3.4. Образование топливных оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив

Работы различных ученых показали, что азотсодержащие соединения, входящие в состав топлив, также являются источни-

ком образования оксидов азота, поступающих в атмосферу с продуктами сгорания.

Топливные NO_x образуются из азотсодержащих соединений топлива при продувании его горячим воздухом уже при температуре 900...1000 К. Во всяком случае при температурах 1000...1400 К на начальном участке факела, где происходит воспламенение и горение летучих, обнаруживается значительный выход NO_x [96].

Если бы все количество азота, содержащегося в топливе, окислялось до NO, то только за счет топливного азота могло бы образоваться при горении углей до 2...4 г/м³, при горении мазута до 0,5...1,0 г/м³. В действительных процессах лишь некоторая часть топливного азота переходит в оксиды азота. Азотсодержащие соединения в углях состоят из аминов, пептидов, аминокислот и др. При нагреве угля в конусе факела в зоне выхода летучих обнаруживаются пиридины, хинолины и другие смолистые вещества, аммиак. Значительная часть азотсодержащих соединений переходит не в эти соединения, а в более прочные – нитриды и др. Поскольку для превращения топливного азота, входящего в такие соединения, как пиридины, хинолины, нитробензол, нитроамины, аммиак и некоторые другие, а также на образование NO требуется меньшая энергия, чем энергия расщепления молекулы N₂, образование существенных количеств NO даже при сравнительно невысоких температурах (1300...1400 °С) вполне возможно [97].

Некоторыми исследователями отмечается, что после возникновения азотистых соединений типа RN с ними протекают конкурирующие реакции, приводящие к образованию топливных NO_x либо N₂, причем реакция (1.34) в восстановительной зоне (при недостатке окислителя) протекает быстрее, чем реакция (1.35):



Параллельно описанной выше одной из теорий проходили и другие изучения, на основании которой были сделаны следующие выводы [98].

- Азотосодержащие соединения топлива при горении частично окисляются до NO , и влияние этого процесса на общее содержание оксида азота в продуктах сгорания должно быть учтено.

- Влияние топливных NO_x на общий выброс оксида азота более существенно при низких температурах процесса горения ($T_{\text{max}} < 1800 \text{ K}$), например, при сжигании низкокачественных углей, особенно при сжигании топлива в кипящем слое; при горении мазута, антрацитов и других высокореакционных топлив в крупных топливосжигающих установках влияние топливных NO_x меньше.

- Образование топливных оксидов азота происходит на начальном участке факела, в области образования «быстрых» NO , и до образования «термических» NO .

- Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO уменьшается с увеличением концентрации азота в топливе. Однако абсолютный выход NO при большем содержании азота топлива будет выше.

- Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO быстро нарастает с увеличением коэффициента избытка воздуха.

- Выход топливных NO сравнительно слабо (особенно по сравнению с термическим NO) зависит от температуры процесса.

- Вид азотосодержащего соединения и содержание кислорода в топливе не оказывают влияния на выход топливных NO .

2. ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ

2.1. Уточненный химизм процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе

При сгорании метановоздушной смеси (МВС) в цилиндре газодизеля с турбонаддувом в результате термического и окислительного пиролиза молекул углеводородов жидкого топлива и метана образуются активные центры цепных реакций – атомы и радикалы, локальная концентрация которых значительна.

В то же время имеются доказательства, что на образование NO_x в цилиндре дизеля с турбонаддувом существенное влияние оказывает не только тепловой режим, но и локальная концентрация активных центров. Кроме того, процесс образования NO_x зависит от скорости расходования в зоне реакции активных частиц и кислорода и конкуренции этих процессов между собой. Взаимодействие образующихся в результате пиролиза топлива атомов и радикалов с азотом, содержащимся в МВС, приводит в конечном итоге к образованию NO_x . Скорость подобных превращений зависит от ряда факторов: концентрации азота в зоне реакции, скорости сгорания топливовоздушной смеси, скорости конкурирующих реакций активных центров и кислорода.

Горение МВС в цилиндре газодизеля с турбонаддувом, воспламененной распыленным запальным ДТ, впрыснутым через многоструйную форсунку, увеличивает масштаб турбулентных пульсаций, что приводит к интенсификации тепломассообмена в факеле и значительно увеличивает скорость разложения NO_x .

Опираясь на результаты моделирования кинетических систем для расчета кинетики образования оксидов азота при горении природного газа и ДТ, кроме того, суммируя известные данные о протекании элементарных реакций при сгорании метана и выделяя из них наиболее весомые, а также учитывая влияние применения турбонаддува, механизм процесса образования NO_x в цилиндре газодизеля с турбонаддувом можно представить в виде определенной последовательности этапов образования промежуточных и конечных элементов, как это показано на рисунке 2.1.

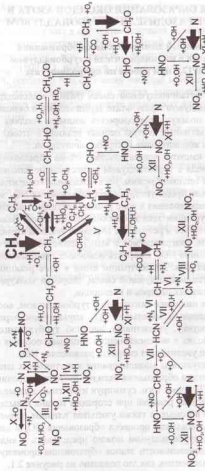


Рисунок 2.1, а - Схема процесса образования оксидов азота в цилиндре газодвигателя с падением в зоне преобразования большого метаноуглеводородного топлива; б - в зоне распространения богатого метаноуглеводородного топлива; в - в зоне распространения богатого метаноуглеводородного топлива; г - в зоне распространения богатого метаноуглеводородного топлива. I - образование NO по биологической реакции; II - окисление NO до NO₂ в прифлаговой зоне; III - образование и разложение теплостойкого азота; NO₂; IV - образование NO за счет распада NO₂; V - термический пиролиз метана; VI - взаимодействие молекулярного азота с углеводородной фракцией; VII - превращение HCN в NO; VIII - образование быстрого NO₂; X - образование термического NO по механизму ЯБ; Зольдориан; XI образование термического NO через радикалы OH; XII - окисление NO до NO₂ в запламенной зоне

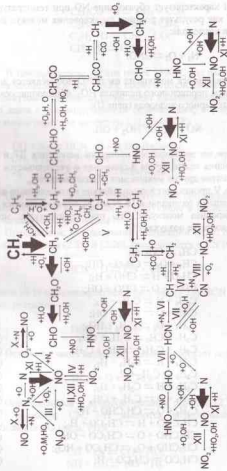


Рис. 2.1, б (расшифровку см. рис. 2.1, а)

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

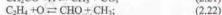
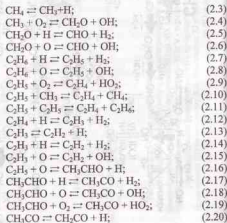


Образовавшийся монооксид азота NO доокисляется до NO_2 под действием пероксидного радикала HO_2 , образующегося в зоне гибели атомарного водорода (цепь II):

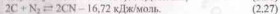
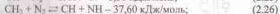


По мере интенсификации процессов испарения ДТ и горения, увеличения температуры и снижения α увеличивается вероятность развития других механизмов образования NO_x .

В цепи V происходит взаимодействие молекулярного азота с углеводородными радикалами HCN и CN, образовавшимся в результате пиролиза молекулы CH_4 при температурах меньше 1500 К и недостатке воздуха [84]:



В температурном уровне менее 1500 К, где имеется недостаток окислителя азота воздуха, кроме столкновения молекул азота с молекулами кислорода происходит взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами, образующимися в результате пиролиза молекулы CH_4 (рис. 2.2):



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

Предполагая, что половина соединений HCN, образовавшегося по реакциям (2.25) и (2.26), превращается в CN (цепь VI):



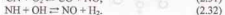
и около 10 % образовавшегося в реакции (2.25) HCN переходит в CN по реакции



Остальная часть переходит в атомарный азот по реакции



Образующиеся в процессе цепных реакций (2.26), (2.28) и (2.29) радикалы CN, NH являются возможными центрами образования NO (цепь VII):



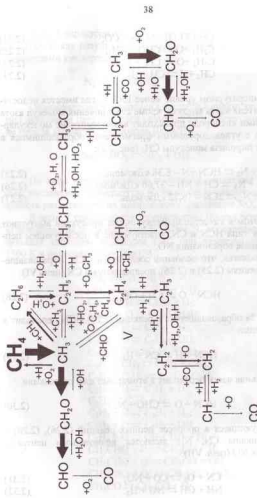


Рисунок 2.2, а - Схема процесса горения металла в цилиндре двигателя с выделением.
 а - в зоне преобладания бедного метанолюдуного выхлопа;
 б - в зоне распространения богатого метанолюдуного выхлопа

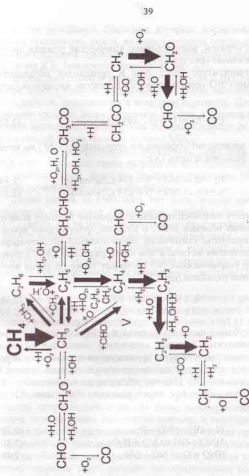


Рисунок 2.2, б (расшифровку см. рис. 2.2, а)

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

При температуре более 2000 К происходит образование «термических» NO при диссоциации молекулы кислорода (цепь VIII) [68]:



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



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



При глубоком пиролизе топлива в КС газодизеля с турбонаддувом находится большое количество локальных объемов МВВ, в которых присутствуют промежуточные химически неустойчивые продукты низкотемпературного разложения метана, в том числе радикалы OH. Поэтому образование термического NO протекает также по схеме через радикалы OH (цепь XI на рис. 2.1) [99]:



При определении теплового режима двигателя наиболее

значимыми реакциями, благодаря которым достигается максимальная температура цикла, являются реакции окисления CH_x , в результате которых происходит образование термических NO по механизму Я.Б. Зельдовича (цепь IX на рис. 2.1).

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

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

Также нельзя не учитывать тот факт, что во время такта расширения происходит образование диоксида азота по реакции 2.2 (ветвь XII на рис. 2.1), который может составлять до 20 % от общего количества образовавшихся оксидов азота.

В отработавших газах газодизеля с турбонаддувом содержатся различные оксиды азота, но подавляющая часть из них образуется в результате пиролиза метана через радикалы OH.

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

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

С точки зрения энергетического эффекта химические превращения подразделяются на два типа: эндотермические, требующие определенного количества энергии, и экзотермические, сопровождающиеся выделением тепла. Ясно, что для протекания эндотермической реакции необходимо, чтобы сталкивающиеся молекулы обладали некоторым минимальным запасом энергии E, поэтому скорость такой реакции пропорциональна бoльмановскому фактору $e^{-E/RT}$ и быстро возрастает с повышением темпе-

ратуры. В процессе диссоциации энергией активации служит энергия связи молекулы. Однако для большинства экзотермических превращений также требуется энергия активации, и скорости соответствующих реакций возрастают с температурой по экспоненциальному закону Аррениуса $e^{-E_a/RT}$. Рекомбинация атомов в молекулу является в этом отношении нетипичной, так как она происходит без активации, и потому с легкостью протекает при низких температурах, как и многие другие реакции с участием свободных атомов [100].

При элементарном акте химического превращения независимо от того, является ли он энергетически выгодным или нет при тесном сближении частиц между ними, как правило, возникают силы отталкивания, для преодоления которых требуется определенная энергия. Для превращения должен быть преодолен потенциальный барьер. На рис. 2.3 схематично представлена потенциальная энергия системы четырех атомов N, OH, NO, H на примере реакции, участвующей в процессе образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом $N + OH \rightarrow NO + H$, в зависимости от «координаты разложения», характеризующей взаимную пространственную конфигурацию атомов.

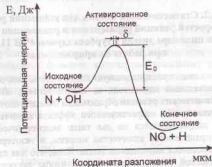


Рисунок 2.3 - Потенциальный барьер химической реакции, соответствующей активированному состоянию

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

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

При этом фактически осуществляется наиболее выгодный путь реакции, соответствующий наименьшему значению максимума энергии; поверхность энергии около этого пути имеет характер «ложбины». Рис. 2.3 схематически изображает сечение поверхности энергии вдоль «дна ложбины», причем путь реакции и соответствует координате разложения.

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

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

Если считать, что каждый образующийся комплекс распадается в сторону продуктов реакции, то число актов реакции в 1 см³

в 1 с равно числу распадов комплексов, т. е. числу комплексов в 1 см^3 , поделенному на время их жизни. Обозначая химическими символами А, В, М числа реагентов А и В и комплексов М в 1 см^3 (для реакции $(\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H})$ А и В есть N и OH, а М = NO·H), получим, что число актов прямой реакции в 1 см^3 в 1 с равно $k_r r_A r_B = P r_{AB} / \tau$, откуда константа скорости прямой реакции [101]

$$k_r = P \frac{1}{\tau} (r_{Au} / r_A r_B), \quad (2.41)$$

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

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

Таблица 2.1 - Соотношения между типом реагирующих веществ и стерическим фактором

Тип реагирующих веществ	Р
Два атома	1
Атом и двухатомная молекула	Z_A / Z_B
Атом и многоатомная молекула	$(Z_A / Z_B)^2$
Две двухатомные молекулы	$(Z_A / Z_B)^3$
Двухатомная и многоатомные молекулы	$(Z_A / Z_B)^4$
Две многоатомные молекулы	$(Z_A / Z_B)^5$

Статистическую сумму можно разложить на произведение:

$$Z = Z_T Z_Q Z_V. \quad (2.42)$$

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

$$Z_T = (2\pi m kT / h^2)^{1/2} \delta, \quad (2.43)$$

где m – масса частицы, кг; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К; h – постоянная Планка, $h = 6,65 \cdot 10^{-34}$, Дж·с.

Вращательная сумма частицы

$$Z_R = \frac{8\pi^2 kT}{h^2} \frac{1}{\sigma}, \quad (2.44)$$

где σ – фактор симметрии, равный увеличенному на единицу числу перестановок одинаковых атомов в молекулу, эквивалентных вращению молекулы как целого; в двухатомной молекуле, состоящей из одинаковых атомов, $\sigma = 2$, а из разных – $\sigma = 1$; I – момент инерции частицы, кг·м².

Квантовое выражение для статистической суммы гармонического осциллятора частоты ν :

$$Z_V = \left(1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right)^{-1}. \quad (2.45)$$

Момент инерции комплекса определяется по выражению

$$I = d_{AB}^2 \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}, \quad (2.46)$$

где d_{AB} – средний диаметр реагентов А и В, $d_{AB} = (d_A + d_B) / 2$, м.

Активированный комплекс находится на вершине энергетического барьера, лежащего между начальным и конечным состоянием (рис. 2.3). Скорость реакции определяется скоростью, с которой активированный комплекс проходит через вершину барьера. Конфигурация, соответствующая активированному состоянию, обладает свойствами обычной молекулы, за исключением того, что частота нормального колебания вдоль координаты разложения имеет мнимое значение. Другими словами, активированный комплекс устойчив по отношению к перемещению во всех направлениях, кроме одного, двигаясь вдоль которого он распадается на части. Если энергетический барьер имеет сравнительно плоскую вершину, то степень свободы, соответствующая координате разложения, статически может рассматриваться как одномерное поступательное движение. Таким образом, активиро-

ванный комплекс сохраняет $3p$ степеней свободы, где p — число атомов, которое он содержит. Согласно «соотношению неопределенностей» квантовой механики, для определения отдельного активированного комплекса необходимо постулировать, что на вершине барьера ему соответствует область, имеющая конечные размеры. В классической теории таких ограничений нет, и для большинства химических реакций вследствие плоской формы барьера эти ограничения несутся. Применяемое ниже статистическое среднее из многих комплексов приводит к тому же результату.

При статическом рассмотрении скоростей реакций будем предполагать, что исходные вещества всегда находятся в равновесии с активированными комплексами, т.е. реакция не изменяет заметным образом равновесную концентрацию активированных комплексов, и что последние разлагаются с конечной скоростью. Положим, что активированному состоянию на вершине энергетического барьера соответствует потенциальный ящик произвольной длины δ (рис. 2.3), действительная величина которой несущественна.

Истинная скорость реакции определяется средней скоростью перехода активированных комплексов через вершину барьера. Обозначим через \bar{v} среднеквадратичную скорость частицы в направлении x . Среднее изменение количества движения при столкновении рассматриваемой молекулы со стенкой равно $2m\bar{v}$. Молекулы, расположенные от стенки на расстоянии x , должны достигать ее за единицу времени. Так как в объеме V имеется N молекул, то за единицу времени о каждый квадратный сантиметр стенки ударяется $\frac{N\bar{v}}{V}$ молекул. Таким образом, скорость изменения количества движения, отнесенная к 1 см^2 поверхности молекул на стенку,

$$g = \frac{2mN\bar{v}^2}{V}. \quad (2.47)$$

Так как поступательная, т.е. кинетическая, энергия для одной степени свободы вдоль оси x равна $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$, то вероятность то-

го, что молекула имеет скорость, лежащую между \dot{v} и $\dot{v} + d\dot{v}$ в данном направлении, равняется:

$$\vartheta(\dot{v}) = e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} d\dot{v}. \quad (2.48)$$

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

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} \dot{v} d\dot{v}}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} d\dot{v}}. \quad (2.49)$$

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

$$\bar{v} = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}, \quad (2.50)$$

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

Среднее время τ прохождения через барьер, являющееся средней продолжительностью жизни активированного комплекса, равняется длине вершины барьера δ , деленной на среднюю скорость \bar{v} , которая определяется из уравнения (2.50) следующим образом:

$$\tau = \frac{\delta}{\bar{v}} = \delta \left(\frac{2\pi m}{kT} \right)^{1/2}. \quad (2.51)$$

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

$$v = \frac{r_M}{\tau} = r_M \left(\frac{\kappa T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta}. \quad (2.52)$$

Трансмиссионный коэффициент ρ показывает долю, которая может действительно покинуть исходное состояние и перейти непосредственно к конечному, не возвращаясь обратно в исходное состояние (рис. 2.3).

Если вещества А, В реагируют друг с другом, образуя активированный комплекс, и k представляет собой удельную скорость реакции, выраженную в единицах концентрации, то действительная скорость, т.е. число молекул, распадающихся в единице объема за единицу времени, равна $\kappa_A \kappa_B$, где κ_A , κ_B — концентрации, выраженные в числах молекул на единицу объема. Следовательно, уравнение (2.41) с учетом выражения (2.51) примет вид

$$k = \rho \frac{r_M}{r_A r_B} \left(\frac{\kappa T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta}. \quad (2.53)$$

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

$$K_e = \frac{\alpha_M}{\alpha_A \alpha_B}, \quad (2.54)$$

где α — активность различных веществ.

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

$$K_e = \frac{r_M}{r_A r_B}. \quad (2.55)$$

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

$$K_e = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}, \quad (2.56)$$

где E_0 — разность между энергиями нулевых уровней на моль активированного комплекса и исходных веществ.

Здесь энергия активации — это величина энергии при $0^\circ K$, которую должны получить исходные вещества, чтобы перейти в активированное состояние и прореагировать.

Теперь когда множитель $e^{-\frac{E_0}{RT}}$ вынесен за знак суммы состояний, при вычислении величин Z в уравнении (2.56) за начало отсчета энергии должны приниматься в каждом случае нулевые энергетические уровни соответствующих веществ. Это условие, конечно, находится в согласии с обычным методом выражения сумм состояний и не усложняет вычислений.

С учетом уравнений (2.55 и 2.56) выражение для константы скорости прямой реакции (2.41) примет вид

$$k_1 = P \frac{Z_M}{Z_A Z_B} \left(\frac{\kappa T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta} e^{-\frac{E_a}{kT}}. \quad (2.57)$$

Примем длину вершины барьера равной

$$\delta = \frac{h}{(2\pi m k T)^{1/2}}. \quad (2.58)$$

Тогда уравнение (2.56) примет вид

$$k_1 = P \rho \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{kT}}. \quad (2.59)$$

Величина $\kappa T/h$ уже является одинаковой для всех типов исходных веществ и для всех реакций, поэтому множитель $\kappa T/h$, имеющий размерность частоты, для каждой температуры является универсальной постоянной. Он представляет собой частоту, с которой активированный комплекс переходит через вершину барьера при данной температуре.

Чтобы учесть возможность того, что не каждый активированный комплекс, достигающий вершины барьера и двигающийся вдоль координаты разложения, будет действительно распадаться и давать продукты реакции, необходимо ввести трансмиссионный коэффициент ρ . Тогда выражение (2.59) примет вид

$$k_1 = P \rho \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{kT}}. \quad (2.60)$$

Комплекс устойчив, как и обычная молекула, по отношению ко всем изменениям конфигурации атомов, за исключением направления вдоль пути реакции. Поэтому если активированный комплекс считать нормальной молекулой, у которой степень свободы, соответствующую координате разложения, можно заменить жесткой связью, то принимая активированные комплексы за нормальные молекулы, выражение $\frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{kT}}$ можно рассматри-

вать как константу равновесия между активированным и начальным состояниями:

$$K^* = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_a}{kT}}. \quad (2.61)$$

Тогда уравнение константы скорости реакции примет вид

$$k_1 = P \rho \frac{\kappa T}{h} K^*. \quad (2.62)$$

Для вывода зависимости значений констант скоростей химических реакций образования оксидов азота с режимами работы двигателя запишем уравнение Клайперона-Менделеева в виде

$$\frac{M_1}{V_2} = 10^3 \frac{P_2 r_1}{RT_2}, \quad (2.63)$$

где M_1 — число молей i -го компонента, кмоль; $V_2 r_1$ — парциальный объем i -го компонента в конце расчетного участка, m^3 ; P_2 — давление в конце расчетного участка, МПа; T_2 — температура в конце расчетного участка, К; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Выражая скорость образования NO на примере реакции $N \cdot + OH \cdot \rightarrow NO \cdot + H \cdot$ с учетом (2.63), получим

$$k' \frac{M_N M_{OH}}{V_2^2} = \frac{10^3 P_2}{RT_2} k_1 r_N r_{OH}, \quad (2.64)$$

где k' — константа скорости реакции, $m^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$.

Из выражения (2.63) имеем:

$$r_N = \frac{10^{-3} RT_2 M_N}{P_2 V_2}; \quad r_{OH} = \frac{10^{-3} RT_2 M_{OH}}{P_2 V_2}. \quad (2.65)$$

Подставив выражения r_N и r_{OH} в уравнение (2.64), получим

$$k_i' = k_i \frac{RT_i}{10^3 p_i}, \quad (2.66)$$

где k_i' – константа скорости i -той реакции, $\text{м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$.

Выведенная зависимость позволяет рассчитать константу скорости химических реакций образования оксидов азота в цилиндре двигателя. Согласно уточненному химизму процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с турбонаддувом, основной вклад в образование и разложение NO дают следующие реакции, представленные в таблице 2.2. Результаты расчетов констант скоростей химических реакций образования и разложения оксидов азота представлены также в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты расчета основных реакций образования и разложения оксидов азота в цилиндре газодизеля с наддувом

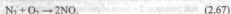
№ реакции	Реакция	Константа реакции, $\text{м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$
1	$\text{N} + \text{OH} \xrightarrow{k_1} \text{NO} + \text{H}$	$k_1' = 1,0 \cdot 10^{11}$
2	$\text{NO} + \text{H} \xrightarrow{k_2} \text{N} + \text{OH}$	$k_2' = 1,0 \cdot 10^{11,23} e^{-24569/T}$
3	$\text{H} + \text{O}_2 \xrightarrow{k_3} \text{OH} + \text{O}$	$k_3' = 1,2 \cdot 10^{14} T_2^{-0,91} e^{-8319/T}$
4	$\text{OH} + \text{O} \xrightarrow{k_4} \text{H} + \text{O}_2$	$k_4' = 1,8 \cdot 10^{10}$
5	$\text{N}_2 + \text{O} \xrightarrow{k_5} \text{NO} + \text{N}$	$k_5' = 7,6 \cdot 10^{10} e^{-38000/T}$
6	$\text{NO} + \text{N} \xrightarrow{k_6} \text{N}_2 + \text{O}$	$k_6' = 1,6 \cdot 10^{10}$
7	$\text{N} + \text{O}_2 \xrightarrow{k_7} \text{NO} + \text{O}$	$k_7' = 6,4 \cdot 10^6 T_2 e^{-3150/T}$
8	$\text{NO} + \text{O} \xrightarrow{k_8} \text{N} + \text{O}_2$	$k_8' = 1,5 \cdot 10^6 T_2 e^{-19500/T}$
9	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \xrightarrow{k_9} \text{NO} + \text{NO}$	$k_9' = 5,48 \cdot 10^{10} e^{-33900/T}$
10	$\text{NO} + \text{NO} \xrightarrow{k_{10}} \text{N}_2 + \text{O}_2$	$k_{10}' = 2,6 \cdot 10^9 e^{-32120/T}$

2.3. Уточненная зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4СН 11,0/12,5 при работе на природном газе

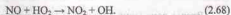
С учетом феноменологии горения дизельного топлива, впрыскиваемого через многоструйную форсунку в МВС цилиндра газодизеля с наддувом, метанотопливовоздушный заряд, образующийся после впрыскивания топлива в КС с учетом вовлечения в движение струи МВС из окружающего пространства, молекулярной и турбулентной диффузии, как в топливном факеле, так и в окружающем пространстве КС в осевом и радиальном направлениях с учетом закручивающегося потока метановоздушного вихря наддувного газодизеля, можно, принимая во внимание, что концентрационная неоднородность также будет иметь место, выделить ряд зон в КС, где характер протекающих процессов и распределение компонентов образования оксидов азота будут существенно отличаться (рис. 2.4) [113].

При турбулентном движении потоков значения скоростей и концентраций оксидов азота непрерывно меняются, в результате чего зоны распространения носят условный характер, и поэтому при перемешивании метановоздушной среды можно говорить лишь об устойчивости средних по времени границ.

Первая зона (зона 1 на рис. 2.4) представляет собой ядро топливного факела с большим количеством локальных объемов, в которых содержится большое количество углеводородного топлива и недостаток окислителя, поэтому для этой зоны характерно образование NO по бимолекулярной реакции, т.е. молекулярный азот, содержащийся в МВС, вступает в реакцию с молекулами кислорода при температуре выше 1000 К:



Далее оксид азота доокисляется до NO_2 :



Количество NO_2 , образовавшегося в результате реакции 2.68, достигает 15 % от общего количества оксидов азота.

В результате турбулентной и молекулярной диффузии образуется большое количество локальных объемов, в которых содержится МВС, готовая к взрыву, и углеводородное топливо, в результате чего появляется возможность образования оксидов азота по другим механизмам.

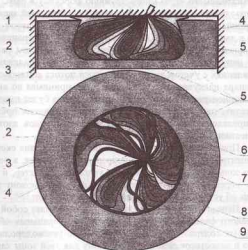
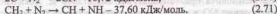
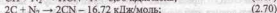


Рисунок 2.4 - Уточненная зонная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: 1 – зона образования NO по бимолекулярной реакции; 2 – зона образования быстрого NO; 3 – зона образования быстрого и термического NO; 4 – зона образования термического NO по механизму Я.Б. Зельдовича; 5 – зона с преобладанием бедного МВВ; 6, 7, 8, 9 – участки с зонами преобладания богатого МВВ

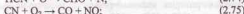
Вторая зона (зона 2 на рис. 2.4) характеризуется также недостатком окислителя, поэтому в оболочке топливного факела происходит образование промежуточных соединений HCN,

CN, NH, непосредственно связанных с образованием «быстрых» NO в температурном диапазоне до 2000 К:

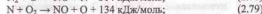


В области фронта горения МВВ (зона 2 на рис.2.4) при высокой температуре до 2000 К и малом коэффициенте α имеет место образование существенных количеств оксида азота.

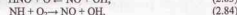
Третья зона (зона 3 на рис. 2.4) – зона быстрого молекулярного перемешивания, высокой температуры и глубокого пиролиза молекулярного метана за счет доокисления радикалов из реакций 2.69, 2.70, 2.71 в присутствии продуктов испарения жидкого углеводородного топлива. В результате этого оксиды азота образуются по «термическому» и «быстрому» механизму:



Далее, за счет увеличения температуры и давления происходит инициирование процесса по «термическому» механизму Я.Б. Зельдовича в виде цепной схемы окисления азота, в которой активную роль играют свободные атомы кислорода и азота:



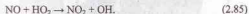
и через радикалы OH:



Четвертая зона (зона 4 на рис. 2.4) характеризуется избытком окислителя в МВВ с турбулентным перемешиванием паров воздуха и топлива, распределенных неравномерно, поэтому образование NO происходит по «термическому» механизму Я.Б. Зельдовича при температурах выше 2000 К. Локальное же образование NO в зонах 3 и 4 связано с концентрацией атомов кислорода, которая зависит от концентрации кислорода в каждой локальной зоне и температуры в ней. Также преимущественны процессы окисления CH_4 , которые являются доминирующими в определении максимальной температуры в цилиндре газодизеля с наддувом.

Зона 5 – зона с преобладанием бедного МВВ, содержащая как свежую МВС так и продукты сгорания, вносимые из зон 1...4. Интенсивность протекания реакции образования NO будет зависеть от величины локального коэффициента избытка воздуха в условиях турбулентного перемешивания смеси.

Участки с зонами 6, 7, 8, 9 являются граничными между реагирующими зонами и непрореагировавшей МВС, в которых возможны только реакции доокисления NO в NO_2 :



Наибольший вклад в процесс образования NO в цилиндре газодизеля с наддувом вносят зоны 3 и 4, поскольку выход оксидов азота зависит от степени турбулизации заряда и величины коэффициента избытка воздуха или локальной концентрации кислорода, длительности процесса сгорания и максимальной температуры цикла. А во время такта сжатия NO не образуется.

3. УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ

3.1. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

Исследование улучшения экологических и эффективных показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе предусматривает проведение стендовых испытаний дизеля при работе по дизельному и газодизельному процессам с целью определения и оптимизации основных параметров работы двигателя.

На дизеле с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 были сняты регулировочные характеристики в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива по дизельному и газодизельному процессам с одновременным индифицированием рабочего процесса и определением токсичности и дымности ОГ. Характеристики снимались для определения оптимального значения установочного УОВТ по дизельному и газодизельному процессам при равных значениях средних эффективных давлений и для оптимизации экологических и эффективных показателей и показателей процесса сгорания дизеля.

3.1.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

Регулировочные характеристики для мощностных и экономических показателей по установочному УОВТ при работе дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по дизельному и газодизельному процессам на частотах вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ представлены на рис. 3.1.

Из графиков N_e , G_n и g_e видно, что при работе по дизельному процессу установочный УОВТ при частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ по условию наилучшей экономичности равен 14° до в.м.т. Часовой расход топлива при работе по дизельному процессу на указанном установочном УОВТ составляет 18 кг/ч при $N_e = 80 \text{ кВт}$, а минимальный удельный эффективный расход топлива — $210 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. Однако заводом-изготовителем для обеспечения лучших экологических показателей автомобильного двигателя с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 рекомендован оптимальный установочный УОВТ в 11° .

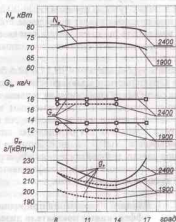


Рисунок 3.1 - Влияние применения природного газа на мощностные и эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ:

при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

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

Из кривых N_e , G_n и g_e , представленных на рис. 3.1, видно, что и при работе на природном газе установочный $\Theta_{\text{впр}}$ в 14° яв-

ляется оптимальным для частоты вращения 2400 мин^{-1} по условию экономичности и g_e составляет при этом $205 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$.

Снижение g_e при переходе работы дизеля на природный газ при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ составляет $2,4 \%$. Суммарный массовый расход топлива составляет при этом $16,9 \text{ кг/ч}$ против 18 кг/ч при дизельном процессе. Снижение достигает $1,1 \text{ кг/ч}$, или $6,5 \%$. Мощность не изменяется и составляет 80 кВт .

Анализируя изменения значений N_e , g_e в зависимости от изменения установочного УОВТ для $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и дизельного процесса, можно отметить следующее. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ значение мощности снижается до $N_e = 79 \text{ кВт}$, а при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ уже до 77 кВт . При $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ мощность также снижается до значений $76,5 \text{ кВт}$. В процентном отношении эффективная мощность снижается в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ на $1,2 \%$, $3,9 \%$ и $4,6 \%$, соответственно.

Значения удельного эффективного расхода топлива при изменении установочного УОВТ меняются более значительно. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ удельный эффективный расход топлива возрастает до $215 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, или на $2,8 \%$, по сравнению с g_e при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$. При $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ значение g_e также возрастает до $230 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, или на $9,5 \%$. G_n на всех установочных УОВТ составляет 18 кг/ч .

Анализируя изменение значений N_e , G_n и g_e в зависимости от изменения установочного УОВТ для $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и работы дизеля на природном газе, можно отметить следующие закономерности. При изменении установочного УОВТ значения мощности изменяются аналогично кривым изменения мощности дизельного процесса и полностью с ними совпадают. Удельный эффективный расход топлива возрастает при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ до $210 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, а при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ — до $218 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. При $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ рабочий процесс дизеля не может быть обеспечен из-за невозможности работы вследствие высокой «жесткости» работы двигателя. Рост g_e составляет $2,4 \%$ и $6,3 \%$, соответственно.

По сравнению с удельным эффективным расходом топлива при работе по дизельному процессу снижение g_e при работе на природном газе составляет в зависимости от установочного УОВТ: для $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ (дизельный процесс — $g_e = 210 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$; газодизельный — $g_e = 205 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, снижение $2,4 \%$); для $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ (дизельный процесс — $g_e = 215 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$; газодизельный —

$g_e = 210$ г/кВт·ч, снижение 2,3 %); для $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ (дизельный процесс – $g_e = 229$ г/кВт·ч; газодизельный – $g_e = 218$ г/кВт·ч, снижение 5 %).

Анализ кривых изменения давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и природном газе, рассмотренный ниже в главе 3.4.1, а также характеристик сгорания и параметров тепловыделения показывает, что при снижении установочного УОВТ с 14° до 11° $p_{z \text{ макс}}$ снижается с 10,75 до 10,25 МПа при работе двигателя по дизельному процессу и с 12 до 11,25 МПа при работе двигателя на природном газе (см. рис. 3.9). Снижение достигает 4,87 % и 6,6 %, соответственно.

При частоте вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту $n = 1900$ мин⁻¹, сохраняется характер изменения кривых эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива, установленный для номинальной частоты вращения двигателя.

На дизельном процессе при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ происходит снижение эффективной мощности дизеля по отношению к принятому оптимальному установочному УОВТ с 72 до 70 кВт, что составляет 2,85 %. Также увеличивается удельный эффективный расход топлива. При $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ он равен 218 г/кВт·ч, а при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ - 205$ г/кВт·ч, увеличение составляет 6,34 %. При установочном УОВТ 14° мощность двигателя остается на прежнем уровне, но при этом уменьшается удельный эффективный расход топлива до 202 г/кВт·ч, что на 1,5 % ниже, чем при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$.

При работе по газодизельному процессу установочный УОВТ на режиме максимального крутящего момента при частоте вращения $n = 1900$ мин⁻¹ по условию наилучшей экономичности равен 14° . Суммарный часовой расход топлива составляет при этом 12 кг/ч, а минимальный удельный эффективный расход топлива – 192 г/кВт·ч. Удельный эффективный расход топлива при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ составляет 203 г/кВт·ч, а при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ - 195$ г/кВт·ч, при этом он возрастает на 5,7 % и 4,1 %, соответственно. При работе на КПГ на режиме максимального крутящего момента необходимо также уменьшить установочный УОВТ для обеспечения качественного процесса сгорания и снижения максимального

давления в цилиндре, поэтому оптимальный установочный УОВТ составляет 11° для дизельного и газодизельного процесса.

Проведенные испытания показали, что дизель устойчиво работает на КПГ при соотношении на номинальном режиме: газа – 80...85 %, запального дизельного топлива – 15...20 %. Исследования рабочего процесса проводились в дальнейшем именно на таком соотношении.

3.1.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 по результатам исследований в зависимости от изменения установочного УОВТ для частоты вращения $n = 2400$ мин⁻¹ и $n = 1900$ мин⁻¹ представлено на рис. 3.2.

Из графиков, представленных на рис.3.2, а для $n = 2400$ мин⁻¹, видно, что с увеличением установочного УОВТ содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по дизельному процессу возрастает от 180 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ$ до 188 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$. При работе двигателя по газодизельному процессу содержание NO_x при $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ$ составляет 170 ppm, а при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ уже 174 ppm. Во всем диапазоне изменения установочного УОВТ содержание оксидов азота в ОГ имеет меньше на 6...8 % значения для газодизеля. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ содержание NO_x снижается на 6 % (со 183 до 172 ppm). Это связано с уменьшением коэффициента избытка воздуха, приводящим к меньшему окислению азота кислородом.

Содержание CH_x с увеличением установочного УОВТ в целом снижается как у дизеля, так и у газодизеля, но при этом газодизельный процесс сопровождается увеличением в ОГ суммарных углеводородов – их содержание в 8...10 раз выше по сравнению с дизельным процессом. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ при работе по дизельному процессу содержание CH_x в ОГ составляет 0,01 %, а при работе на природном газе содержание CH_x в ОГ составляет уже 0,2 %, что выше в 20 раз. Это вызвано нарушением процесса сгорания при работе на КПГ.

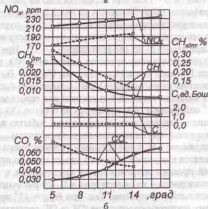
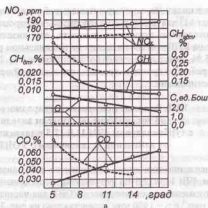


Рисунок 3.2 - Влияние применения природного газа на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ:

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

—○— дизельный процесс; —□— газодизельный процесс

Содержание сажи по дизельному процессу с увеличением установочного УОВТ снижается с 3,5 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{\text{упр}} = 5^\circ$ до 1,5 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{\text{упр}} = 17^\circ$. При работе по газодизельному процессу содержание сажи практически не зависит от установочного УОВТ и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. При $\Theta_{\text{упр}} = 11^\circ$ при работе двигателя на природном газе содержание сажи в ОГ ниже в 25 раз по сравнению с дизелем на том же установочном УОВТ. Это объясняется высокой турбулентной зарядкой, приводящей к интенсификации процессов выгорания сажевых частиц в цилиндре газодизеля.

Содержание CO по дизельному процессу с увеличением установочного УОВТ возрастает с 0,026 % при $\Theta_{\text{упр}} = 5^\circ$ до 0,062 % при $\Theta_{\text{упр}} = 17^\circ$. При работе двигателя на КПГ содержание CO, наоборот, снижается. При $\Theta_{\text{упр}} = 11^\circ$ содержание CO составляет 0,04 %, что на 12,5 % ниже показателей для дизеля при том же установочном УОВТ.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения УОВТ на regime максимального крутящего момента при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ представлено на рис. 3.2, б.

Закономерности изменения содержания токсичных компонентов с увеличением установочного УОВТ аналогичны закономерностям изменения содержания при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. Так, при $\Theta_{\text{упр}} = 11^\circ$ содержание в ОГ дизеля NO_x составляет 225 ppm, а при работе двигателя на КПГ содержание NO_x в ОГ составляет уже 190 ppm, что на 18,4 % ниже. Содержание CH_x в ОГ дизеля составляет 0,01 %, а при работе на КПГ содержание CH_x в ОГ двигателя составляет уже 0,17 %, что в 17 раз выше. При $\Theta_{\text{упр}} = 11^\circ$ содержание сажи в ОГ двигателя при работе КПГ ниже в 19 раз, чем при работе по дизельному процессу на том же установочном УОВТ. CO в ОГ газодизеля возрастает от 0,042 до 0,050 %, что выше на 19 % по сравнению с дизельным процессом.

На основании анализа полученных результатов 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 в 11° п.к.в., так как на этом угле суммарная токсичность ОГ минимальна. Данный УОВТ установлен заводом-

изготовителем, и дальнейшие исследования рабочего процесса проводились при этом значении угла опережения впрыскивания топлива.

3.2. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

При работе дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 были сняты нагрузочные характеристики на каждом скоростном режиме на трех углах опережения впрыскивания топлива в 8, 11 и 14 градусах до в.м.т. по дизельному и газодизельному процессам с одновременным индицированием рабочего процесса и определением токсичности и дымности ОГ. Характеристики снимались для определения и оптимизации мощностных, экономических и экологических показателей двигателя, а также показателей горения и характеристик тепловыделения.

3.2.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

Нагрузочные характеристики изменения мощностных и экономических показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном УОВТ в 11° при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ на номинальной частоте вращения представлены на рис. 3.3.

Из графиков видно, что при работе по дизельному процессу на оптимальном установочном УОВТ при изменении нагрузки от 0,12 до 0,88 МПа расход воздуха G_a возрастает с 400 до 500 кг/ч, или на 25 %. Коэффициент наполнения возрастает с 0,97 до 0,99, что составляет 2,1 %. Температура отработавших газов t_r в выпускном трубопроводе увеличивается с 280 до 480 $^{\circ}\text{C}$, рост температуры составляет 71,4 %. Температура во впускном трубопроводе после турбокомпрессора t_s возрастает с 55 до 107 $^{\circ}\text{C}$, или на 94,5 %. Коэффициент избытка воздуха α изменяется с 4,1 до 1,75,

снижение при этом в 2,4 раза. Эффективный коэффициент полезного действия η_e возрастает с 0,18 до 0,36 и, соответственно, увеличивается в два раза. Часовой расход топлива G_t изменяется с 7 до 19,5 кг/ч, или в 2,8 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e снижается до 218 г/кВт·ч.

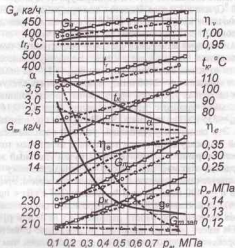


Рисунок - 3.3 Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{всп}} = 11^{\circ}$; —●—●— дизельный процесс; —○—○— газодизельный процесс —▲—▲— расход запального ДТ

Из кривых, представленных на рис. 3.3, видно, что при переходе работы дизеля на природный газ на оптимальном установочном УОВТ 11° при изменении нагрузки от 0,12 до 0,85 МПа суммарный расход топлива возрастает с 8,2 до 16,8 кг/ч, т.е. в два раза. Величина запального дизельного топлива

уменьшается с увеличением нагрузки. Так, на номинальной нагрузке ($p_e = 0,85$ МПа) эта величина составляет 2,8 кг/ч, снижение составляет 6,7 %. При увеличении нагрузки g_e снижается до 205 г/кВт·ч. Эффективный КПД возрастает до 0,38, и рост составляет 2,7 раза. Расход воздуха возрастает с 380 до 450 кг/ч, увеличение составляет 18,4 %. Температура ОГ t_e возрастает с 220 до 430 °С, или в 1,9 раза. Вместе с тем при работе на КПГ снижается значение коэффициента избытка воздуха во всем диапазоне нагрузок с 2,7 до 1,7, снижение составляет 37 %.

Анализируя изменения значений эффективных показателей работы дизеля по дизельному и газодизельному процессу в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{нр}} = 11^\circ$ на номинальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, можно отметить следующее. На малых нагрузках удельный эффективный расход топлива при газодизельном процессе несколько выше (при $p_e = 0,16$ МПа на 3 %: $g_e = 335 \text{ г/кВт·ч}$ против 325 г/кВт·ч), чем при дизельном процессе. Это связано с ухудшением условий воспламенения обедненной газозоудушной смеси запальным дизельным топливом и процесса сгорания. С увеличением нагрузки удельный эффективный расход топлива при работе по газодизельному процессу уменьшается по сравнению с дизельным процессом: при $p_e = 0,85$ МПа и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ g_e на 5 % меньше (208 г/кВт·ч против 218 г/кВт·ч). Эффективный КПД (η_e), определяющий степень использования теплоты, при работе двигателя на КПГ при p_e меньше 0,7 МПа имеет меньшее значение по сравнению с чисто дизельным процессом и становится выше при p_e большем чем 0,7 МПа. Эффективный КПД возрастает с увеличением нагрузки и при использовании КПГ на номинальном режиме работы составляет $\eta_{e\text{д}} = 0,38$, что на 5,6 % выше, чем для дизельного процесса.

Анализируя изменения значений часового расхода топлива в зависимости от изменения нагрузки можно отметить, что кривая G_e при дизельном процессе проходит выше G_e газодизельного процесса в области нагрузок p_e более чем 0,25 МПа, и с увеличением нагрузки часовой расход топлива растет. При $p_e = 0,85$ МПа G_e снижается с 18,6 до 16,8 кг/ч, или на 9,7 %. Это обусловлено тем, что на газодизельном процессе двигатель работает на смеси более обедненного состава.

Анализ кривых изменения температуры ОГ в выпускном трубопроводе дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и природном газе показывает, что снижение температуры с 480 до 410 °С при $p_e = 0,85$ МПа на номинальном режиме составляет 17,1 %. Коэффициент избытка воздуха α на номинальном режиме при работе дизеля на КПГ во всем диапазоне нагрузок имеет меньшие значения по сравнению с дизельным процессом. При $p_e = 0,84$ МПа он имеет значения 1,6 и 1,8, соответственно, снижение составляет 11,1 %. Можно сделать вывод, что газодизель работает на смеси более обогащенной.

Расход воздуха двигателем также снижается при переходе с дизельного на газодизельный процесс, что говорит о замещении воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, природным газом. Расход воздуха на газодизельном процессе несколько ниже, чем на дизельном процессе, на всех нагрузочных режимах работы. Так, при $p_e = 0,85$ МПа и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ для газодизеля $G_a = 450 \text{ кг/ч}$, для дизеля $G_a = 490 \text{ кг/ч}$, что на 8,8 % выше.

3.2.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки

Нагрузочные характеристики изменения содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном УОВТ 11° при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ на номинальной частоте вращения представлены на рис. 3.4.

Из графиков, представленных на рис. 3.4, видно, что с увеличением нагрузки содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по дизельному процессу возрастает от 160 ppm при $p_e = 0,12$ МПа до 185 ppm при $p_e = 0,88$ МПа. Рост составляет 15,6 %. Содержание CH_4 с увеличением нагрузки в целом снижается с 0,025 до 0,010 %, т. е. в 2,5 раза. Содержание сажи по дизельному процессу с увеличением нагрузки возрастает с 0,9 до 2,6 ед. по шкале Bosch и, соответственно, увеличивается в 2,9 раза. Содержание СО изменяется с 0,035 до 0,047 %, или увеличивается на 34,3 %.

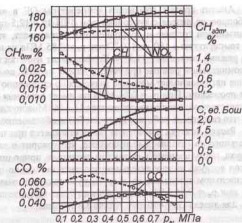


Рисунок 3.4 - Влияние применения природного газа на показатели токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{exp}} = 11^\circ$
 —●— дизельный процесс; —□— газодизельный процесс

Из кривых, представленных на рис. 3.4, видно, что при работе на природном газе содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по газодизельному процессу возрастает незначительно: от 165 ppm при $p_e = 0,12 \text{ МПа}$ до 170 ppm при $p_e = 0,85 \text{ МПа}$, рост составляет 3%. Содержание CH_4 с увеличением нагрузки снижается с 1,6 до 0,2%, или в 8 раз. Содержание сажи по газодизельному процессу с увеличением нагрузки практически не изменяется и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch на всем диапазоне нагрузок. Содержание CO уменьшается с 0,059 до 0,039%, снижение составляет 51,2%.

Анализируя изменения значений содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при установочном УОВТ 11° на номинальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, можно отметить

следующее. Содержание оксидов азота в отработавших газах при работе по газодизельному процессу ниже, чем по дизельному, во всем диапазоне изменения нагрузок. Так при $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ содержание NO_x снижается на 6,4% (со 183 до 172 ppm). Снижение достигается уменьшением длительности процесса сгорания при работе на природном газе. Существенно снижается содержание в отработавших газах сажи при работе по газодизельному процессу на всем диапазоне нагрузок. На дизельном процессе максимальное содержание сажевых частиц составляет 2,5 ед. по шкале Bosch, а на газодизеле на 96% меньше. Это объясняется тем, что метан из всех топлив наименее склонен к образованию сажи. Вместе с тем необходимо отметить, что при работе по газодизельному процессу возрастает содержание в отработавших газах CO на малых и средних нагрузках. Однако с увеличением нагрузки содержание CO в отработавших газах при работе по газодизельному процессу снижается и при среднем эффективном давлении 0,7 МПа равняется содержанию CO в отработавших газах дизельного процесса, а при дальнейшем увеличении нагрузки лежит ниже значений дизельного процесса и при $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ содержание CO при работе на КПГ равно 0,039%, против 0,045%, разница в 15,4%.

Анализируя содержание в отработавших газах суммарных углеводородов CH_4 , следует отметить: содержание существенно возрастает при уменьшении нагрузки и достигает максимума при сбросе нагрузки до режима близкого к холостому ходу. При этом содержание CH_4 в ОГ дизеля составляет 0,01% ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$), а при работе на КПГ содержание CH_4 в ОГ двигателя составляет уже 0,20%, что в 20 раз больше. Это объясняется тем, что суммарные углеводороды и оксид углерода являются продуктами неполного сгорания, то на увеличение их процентного содержания в отработавших газах оказывает влияние ухудшение процесса сгорания на малых нагрузках из-за переобеднения газозооушной смеси вследствие использования качественного способа регулирования мощности и воспламенения запальным дизельным топливом. В результате на малых нагрузках процесс распространения фронта пламени и весь процесс сгорания в целом протекает более вяло, способствуя неполному сгоранию топлива и, как

следствие, ухудшению эффективного коэффициента полезного действия.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей режиму максимального крутящего момента по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном УОВТ 11° , представлены на рис. 3.5.

Из графиков видно, что при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей максимальному крутящему моменту, закономерности изменения содержания токсичных компонентов с увеличением нагрузки, аналогичны закономерностям изменения содержания при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением нагрузки содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по дизельному процессу возрастает от 169 ppm при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 230 ppm при $p_e = 0,92 \text{ МПа}$, рост составляет 36,1 %. Содержание CH_x с увеличением нагрузки в целом снижается с 0,024 до 0,008 %, т.е. в три раза. Содержание сажи по дизельному процессу с увеличением нагрузки возрастает с 0,5 до 2 ед. по шкале Bosch и, соответственно увеличивается в 4 раза. Содержание CO изменяется с 0,04 ($p_e = 0,13 \text{ МПа}$) до 0,047 % ($p_e = 0,45 \text{ МПа}$), или на 17,5 %, а при $p_e = 0,92 \text{ МПа}$ снова снижается до 0,041 %.

Из кривых, представленных на рис. 3.5, видно, что при работе на природном газе содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по газодизельному процессу возрастает незначительно: от 166 ppm при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 190 ppm при $p_e = 0,85 \text{ МПа}$, рост составляет 14,5 %. Содержание CH_x с увеличением нагрузки снижается с 0,53 до 0,17 %, или в 3,1 раза. Содержание сажи по газодизельному процессу с увеличением нагрузки практически не изменяется и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch на всем диапазоне нагрузок. Содержание CO уменьшается с 0,066 до 0,05 %, снижение составляет 32 %.

Анализируя изменения значений содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при установочном УОВТ 11° на режиме максимального крутящего момента при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, можно отметить следующее. На этой частоте вращения зависимости изменения содержания токсичных компонентов в обрабо-

танных газах при переходе с одного вида рабочего процесса на другой аналогичны зависимостям при частоте вращения 2400 мин^{-1} . Содержание оксидов азота в отработавших газах лежит ниже во всем диапазоне нагрузок при работе по газодизельному процессу. Значительно снижается содержание в отработавших газах сажи. Рост содержания CO в отработавших газах при работе по газодизельному процессу наблюдается во всем диапазоне изменения нагрузок. Недостатком на сегодняшний день следует считать увеличение выбросов продуктов неполного сгорания (CH_x) с отработавшими газами при работе на природном газе. Очевидно, в этом случае возникает необходимость применения известных средств снижения токсичности отработавших газов двигателями внутреннего сгорания.

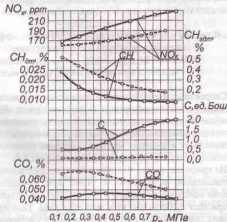


Рисунок 3.5 - Влияние применения природного газа на показатели токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{всп}} = 11^{\circ}$.

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

3.3. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

При работе дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 были сняты скоростные характеристики при равных значениях эффективной мощности и крутящего момента с включенным и выключенным регулятором на трех углах опережения впрыскивания топлива в 8, 11 и 14 градусов до в.м.т. по дизельному и газодизельному процессам с одновременным индцированием рабочего процесса и определением токсичности и дымности ОГ. Характеристики снимались для определения и оптимизации мощностных, экономических и экологических показателей двигателя, а также показателей горения и характеристик тепловыделения.

3.3.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

Скоростные характеристики изменения мощностных и экономических показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном УОВТ 11° в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором представлены на рис. 3.6.

Из графиков видно, что при работе по дизельному процессу на оптимальном установочном УОВТ при изменении частоты вращения коленчатого вала от 1200 до 2400 мин⁻¹ расход воздуха G_a возрастает с 200 до 490 кг/ч, или в 2,4 раза. Температура отработавших газов t_g в выпускном трубопроводе увеличивается с 350 до 490 °С, рост температуры составляет 40 %. Температура во впускном трубопроводе после турбокомпрессора t_c возрастает с 50 до 103 °С, или в 2,1 раза. Коэффициент избытка воздуха α изменяется с 2,7 до 1,7, снижение при этом составляет 59 %. Часовой расход топлива G_t изменяется с 6,5 до 18,4 кг/ч, или в 2,8 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e возрастает со 198

до 218 г/кВт·ч, или на 10,1 %. Эффективная мощность N_e возрастает от 30 до 80 кВт при $n = 2400$ мин⁻¹, т.е. в 2,6 раза, а затем резко снижается до 50 кВт при $n = 2500$ мин⁻¹.

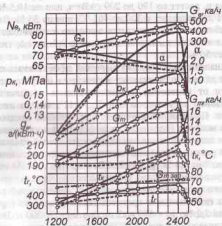


Рисунок 3.6 - Влияние применения природного газа на мощностные и экономические показатели работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором при $\Theta_{вп} = 11$ градусом: \square — дизельный процесс; \circ — газодизельный процесс

Из кривых, представленных на рис. 3.6, видно, что при переходе работы дизеля на природный газ на оптимальном установочном УОВТ 11° при изменении частоты вращения коленчатого вала от 1200 до 2400 мин⁻¹ суммарный массовый расход топлива возрастает с 6 до 16,5 кг/ч, т.е. в 2,8 раза. Величина запального дизельного топлива возрастает с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Так, на номинальной частоте вращения ($n = 2400$ мин⁻¹) эта величина составляет 3,2 кг/ч, рост составляет 77,7 %. Это объясняется ростом числа циклов в единицу времени, а также повышением стабильности работы ТПА и снижением

гидравлических потерь с увеличением частоты вращения. Часовой расход G_v возрастает со 180 до 450 кг/ч, т.е в 2,5 раза. При увеличении частоты вращения удельный эффективный расход топлива g_e растет со 190 до 209 г/кВт·ч, или на 10,5 %. Температура ОГ t_e возрастает с 300 до 405 °С, или на 35 %. Вместе с тем при работе на КПГ снижается значение коэффициента избытка воздуха во всем диапазоне нагрузок с 2,5 до 1,6, снижение составляет 56 %.

Анализируя изменения значений эффективных показателей работы дизеля по дизельному и газодизельному процессу в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$, можно отметить следующее. При равных значениях эффективной мощности и крутящего момента (поскольку цели форсирования дизеля не было) во всем диапазоне частот вращения суммарный удельный эффективный расход топлива на газодизельном процессе ниже (при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ на 4,3 %: $g_e = 209 \text{ г/кВт·ч}$ против $g_e = 218 \text{ г/кВт·ч}$), чем при дизельном процессе. С уменьшением частоты вращения коленчатого вала суммарный удельный эффективный расход топлива на газодизельном процессе также снижается (при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ на 5,2 %: $g_e = 190 \text{ г/кВт·ч}$ против $g_e = 200 \text{ г/кВт·ч}$) в отличие от дизельного процесса. Это объясняется высокой удельной теплотой сгорания газа и снижением в связи с этим массового расхода топлива. Снижается также и суммарный часовой расход топлива для газодизеля, поскольку удельная теплота сгорания газа выше, чем у дизельного топлива, на 14 %. При $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ $G_t = 17,1 \text{ кг/ч}$ для дизельного процесса и $G_t = 16,1 \text{ кг/ч}$ для газодизеля, снижение составляет 6,2 %. При $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ $G_t = 14 \text{ кг/ч}$ для дизельного процесса и $G_t = 13 \text{ кг/ч}$ для газодизеля, снижение составляет 7,6 %. Температура ОГ при газодизельном процессе ниже, чем при дизельном процессе, во всем диапазоне частот вращения. Часовой расход запального дизельного топлива изменялся от 1,7 до 2,9 кг/ч при изменении частоты вращения от $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$. Таким образом, снижение расхода дизельного топлива за счет замещения его газом на всех скоростных режимах составило не менее 80 %.

Коэффициент избытка воздуха α при работе дизеля на КПГ во всех диапазонах частот вращения имеет меньшие значения по

сравнению с дизельным процессом. При $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ он имеет значения 1,6 и 1,8, соответственно, снижение составляет 12,5 %. Можно сделать вывод, что газодизель работает на смеси более обогащенного состава.

Расход воздуха двигателем также снижается при переходе с дизельного на газодизельный процесс, что говорит о замещении воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, природным газом. Расход воздуха на газодизельном процессе несколько ниже, чем на дизельном процессе, на всех частотах вращения коленчатого вала. Так, при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ для газодизеля $G_a = 450 \text{ кг/ч}$, для дизеля $G_a = 490 \text{ кг/ч}$, что на 8,8 % выше.

Проведенное ранее индцирование процесса сгорания газодизельного цикла позволило установить, что сгорание газозудной смеси при воспламенении ее запальным дизельным топливом происходит более активно, с большими скоростями и заканчивается быстрее. Это приводит, с одной стороны, к увеличению максимального давления сгорания p_z , а также характеристик сгорания и параметров тепловыделения; показывает, что при увеличении частоты вращения коленчатого вала $p_{z \text{ max}}$ снижается с 11,25 до 10,25 МПа при работе двигателя по дизельному процессу и с 12 до 11,25 МПа при работе двигателя на природном газе (см. рис. 3.10). Снижение достигает 9,8 % и 6,6 %, соответственно.

С другой стороны, возрастает индикаторный к.п.д., поскольку потери тепла в данном случае уменьшаются. Суммарный часовой расход топлива дизеля при работе по газодизельному процессу снижается. Коэффициент избытка воздуха при газодизельном процессе лежит несколько ниже дизельного процесса во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала. Характер изменения крутящего момента M_e плавный, поскольку интервал частоты вращения, в котором работает двигатель по скоростной характеристике, достаточно велик. При работе на природном газе характер изменения крутящего момента в зависимости от частоты вращения сохраняется. При этом значение максимального крутящего момента составляет 1900 мин^{-1} .

3.3.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

Скоростные характеристики изменения содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на установочных углах опережения впрыскивания топлива 8, 11 и 14 градусов в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала представлены на рис. 3.7.

Из графиков видно, что при работе по дизельному процессу изменение значения установочного УОВТ от 8 до 14° п.к.в. приводит к возрастанию содержания в ОГ оксидов азота NO_x при частоте вращения $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ с 252 до 270 ppm, т.е. на 7,1 %, при увеличении частоты вращения коленчатого вала до $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ содержание оксидов азота на всех углах становится практически одинаковым и составляет 183 ppm. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ увеличение частоты вращения коленчатого вала от $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ приводит к снижению содержания в ОГ NO_x с 265 до 170 ppm, т.е. на 35,8 %.

При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ от 14 до 8° содержание СН в ОГ возрастает во всем рассматриваемом диапазоне частот вращения. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ содержание СН в ОГ меняется от 0,023 % при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 0,013 % при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, т.е. снижается в 1,8 раза. А при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ содержание СН в ОГ снижается от 0,012 до 0,007 % при увеличении частоты вращения от 1200 до 1900 мин^{-1} , т.е. снижается в 1,7 раза, а затем возрастает до 0,010 %, т.е. в 1,4 раза. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ содержание СН в ОГ практически не зависит от частоты вращения и составляет порядка 0,010 %.

Анализируя изменения значений показателей токсичности ОГ в зависимости от частоты вращения на различных установочных УОВТ можно отметить следующее. При работе по газодизельному процессу содержание NO_x в ОГ ниже, чем при работе по дизельному процессу, во всем диапазоне частот вращения. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ увеличение частоты вращения от $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ приводит к росту содержания NO_x в ОГ от 170 до 190 ppm, т.е. на 11,8 %, а при повышении частоты враще-

ния до 2500 мин^{-1} содержание NO_x в ОГ снова снижается до 170 ppm, т.е. на 10,5 %. 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 с турбонаддувом возрастает. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ при изменении частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} содержание сажи в ОГ возрастает от 1,7 до 2,5 ед. по шкале Bosch, т.е. в 1,5 раза.

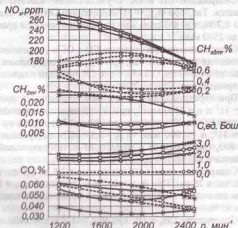


Рисунок 3.7 - Влияние применения природного газа на показатели токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$; $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$; $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$:

х—х — дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$;

□—□ — дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$;

△—△ — дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$;

х—х—х — газодизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$;

○—○—○ — газодизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$;

△—△—△ — газодизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$.

При работе на газодизеле содержание сажи практически не зависит от частоты вращения и от значений установочного УОВТ и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. Содержание CO в ОГ дизеля также сильно зависит от значения установочного УОВТ. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ изменение частоты вращения от 1200 до 1900 мин^{-1} приводит к снижению содержания CO от 0,057 до 0,046 %, т.е. в 1,2 раза, а затем возрастает до 0,055 % при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, т.е. в 1,2 раза.

Содержание СН в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ содержание СН в ОГ снижается с 0,6 до 0,2 %, т.е. в 3 раза, при повышении частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} .

Содержание оксида углерода CO в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ содержание CO в ОГ снижается с 0,060 до 0,038 %, т.е. в 1,6 раза, при возрастании частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} .

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, принятого нами за оптимальный, содержание NO_x в ОГ снижается со 183 до 172 ppm, т.е. на 6 %. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$, $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ содержание оксидов азота NO_x при переходе с дизельного на газодизельный процесс снижается с 225 до 190 ppm, то есть на 15,6 %.

Содержание сажи в ОГ снижается с 2,5 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 25 раз. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$, $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $p_c = 0,84 \text{ МПа}$ содержание сажи в ОГ снижается с 2 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 95 %.

Содержание CH_4 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ возрастает 0,010 до 0,17 %, т.е. в 17 раз. При уменьшении частоты вращения до $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ содержание СН в ОГ возрастает от 0,01 до 0,20 %, т.е. в 20 раз.

Содержание CO при $\Theta_{\text{впр}} = 11^{\circ}$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ снижается с 0,046 до 0,039 %, т.е. в 1,2 раза, с уменьшением частоты до $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ содержание CO возрастает с 0,042 до 0,050 %, то есть на 19 %.

3.4. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5

3.4.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ

На рис. 3.8, а представлено объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота и показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива для номинальной частоты вращения 2400 мин^{-1} .

Из графиков видно, что с увеличением угла опережения впрыскивания топлива при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, а также максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя.

При всех значениях установочных УОВТ при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя.

Так, при работе по газодизельному процессу при $\Theta_{\text{впр}} = 5^{\circ}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 253 ppm и 0,0340 г/м^3 , соответственно, что ниже на 3 % дизельного процесса. При работе по газодизельному процессу при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 14^{\circ}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 265 ppm и 0,0350 г/м^3 , соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса.

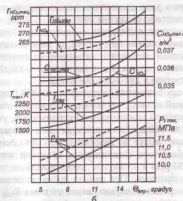
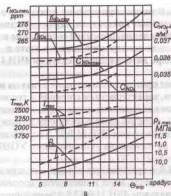


Рисунок 3.8 - Влияние применения природного газа на объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота и показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ:

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

— — — — — дизельный процесс; ○ — — — — газодизельный процесс

На рис. 3.8, б представлено объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота и показатели процесса сгорания дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива при частоте вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$.

Из графиков видно, что с увеличением установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам также возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, максимальные давления газов и температура в цилиндре двигателя.

При всех значениях углов опережения впрыскивания топлива при переходе на газодизельный процесс также происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 5^\circ$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 258 ppm и $0,0346 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 3 % дизельного процесса. При работе по газодизельному процессу при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 262 ppm и $0,0350 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса. Это связано с неравномерным распределением температуры в зоне горения, что значительно влияет на выход NO.

Таким образом, по показателям объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и показателям процесса сгорания необходимо для газодизеля принять оптимальный установочный УОВТ - 11° до в.м.т.

Увеличение показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения при работе по газодизельному процессу на всех исследуемых углах объясняется в первую очередь тем, что при работе на КПГ увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, то есть процесс сгорания происходит в меньший период времени и более интенсивно, что, в свою очередь, препятствует окислению азота. МВС в условиях недостатка кислорода замедляет процесс образования оксидов азота в цилиндре и, соответственно, снижает содержание оксидов азота в ОГ дизеля.

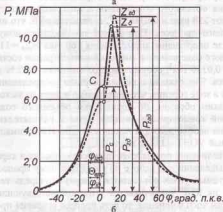
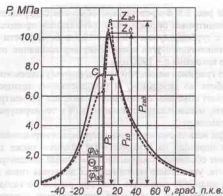


Рисунок 3.9 - Влияние применения природного газа на индикаторные диаграммы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$:
 а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$
 — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Индикаторные диаграммы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 11 градусов, частоте вращения 2400 мин^{-1} и номинальной нагрузке представлены на рис. 3.9, а.

Из графиков видно, что при работе по газодизельному процессу увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, значительно возрастает максимальное давление в цилиндре. Угол наклона кривой давления увеличивается, что свидетельствует о возрастающей жесткости процесса сгорания. На линии расширения кривая давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Индикаторные диаграммы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива 11 градусов, частоте вращения 1900 мин^{-1} представлены на рис. 3.9, б.

Общие закономерности изменения кривой давления в зависимости от угла поворота коленчатого вала, рассмотренные для частоты 2400 мин^{-1} , характерны и для этого режима. При переходе на газодизельный процесс повышается максимальное давление в цилиндре, жесткость процесса сгорания, увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при расширении кривая давления газов при газодизельном процессе лежит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 2400 мин^{-1} и $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ представлены на рис. 3.10, а.

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре

составляет 270 ppm, что выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 4 % и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Следовательно, это говорит о том, что с уменьшением температуры происходит активное разложение образовавшегося оксида азота. Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 261 ppm; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 255 %, что ниже на 3 % дизельного процесса.

Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет $0,0348 \text{ г/м}^3$; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет $0,0342 \text{ г/м}^3$, что ниже на 2 % дизельного.

Графики объемного содержания, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 1900 мин^{-1} и $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ представлены на рис. 3.10, б.

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре составляет 273 ppm, что выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 3 % и на 34 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 265 ppm; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 260 ppm, что ниже на 2 % дизельного процесса.

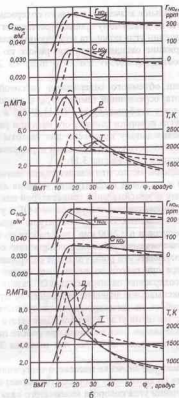


Рисунок 3.10 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала двигателя при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$: а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:
 — дизельный процесс; ---- газодизельный процесс

Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет $0,0353 \text{ г/м}^3$; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет $0,0347 \text{ г/м}^3$, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, средней температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 2400 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 11 град ов представлены на рис. 3.11, а.

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11 \text{ град}$ ов и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре составляет 272 ppm , что выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 4 % и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 263 ppm ; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 257 ppm , что ниже на 3 % дизельного процесса.

Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет $0,0350 \text{ г/м}^3$; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет $0,0344 \text{ г/м}^3$, что ниже на 2 % дизельного процесса.

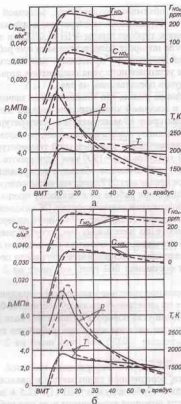


Рисунок 3.11 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала двигателя при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$: а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;
 — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 1900 мин⁻¹ и установочного угла опережения впрыскивания топлива 11 градусов представлены на рис. 3.11, б.

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11$ градусов и $n = 1900$ мин⁻¹ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 4 % и на 37 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме. Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 277 ppm; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 262 ppm, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 0,0357 г/м³; при этом же значении угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 0,0350 г/м³, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 2400 мин⁻¹ и установочного угла опережения впрыскивания топлива 14 градусов представлены на рис. 3.12, а.

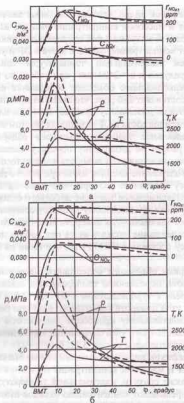


Рисунок 3.12 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала двигателя при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$: а - $n = 2400$ мин⁻¹; б - $n = 1900$ мин⁻¹; — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 14$ градусов и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре составляет 280 ppm, что выше содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу на 4 % и на 38 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же режиме.

Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 270 ppm; при этом же значения угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 265 ppm, что ниже на 2 % дизельного процесса. Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет $0,0355 \text{ г/м}^3$; при этом же значения угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет $0,0350 \text{ г/м}^3$, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, средней температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному и газодизельному процессам для частоты вращения 1900 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 14 градусов представлены на рис. 3.12, б.

Из графиков видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре следуют также сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию оксидов азота в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота в цилиндре составляет 282 ppm, что выше содержания оксидов азота в цилиндре при работе по дизельному процессу на 4 % и на 30 % выше содержания оксидов азота в ОГ газодизеля на этом же ре-

жиме. Максимальное значение объемного содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет 273 ppm; при этом же значения угла поворота коленчатого вала двигателя объемное содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет 268 ppm, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Максимальное значение массового содержания оксидов азота при работе по дизельному процессу составляет $0,0363 \text{ г/м}^3$; при этом же значения угла поворота коленчатого вала двигателя массовое содержание оксидов азота при работе по газодизельному процессу составляет $0,0363 \text{ г/м}^3$, что ниже на 2 % дизельного процесса.

3.4.2. Влияние применения природного газа на характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах

Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период при работе по газодизельному процессу приводит к снижению доли потерь тепла в этот период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование тепла в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 2400 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 8 градусов представлены на рис. 3.13, а.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация NO_x , максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя. Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации NO_x , увеличение максимальных давления газов и темпе-

ратуры в цилиндре. Так, при работе по газодизельному процессу при $p_0 = 0,84$ МПа значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 255 ppm и $0,0341$ г/м³, соответственно, что ниже на 3 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 1900 мин⁻¹ и установочного угла опережения впрыскивания топлива 8 градусов представлены на рис. 3.13, б.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, максимальное давление газов и температура в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при $p_0 = 0,92$ МПа значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 260 ppm и $0,0347$ г/м³, соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 2400 мин⁻¹ и установочного угла опережения впрыскивания топлива 11 градусов представлены на рис. 3.14, а.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, максимальное давление газов и температура в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя.

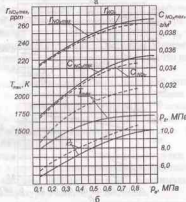
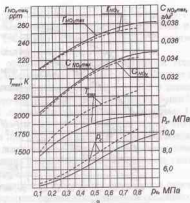


Рисунок 3.13 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{всп} = 8^\circ$:
а - $n = 2400$ мин⁻¹; б - $n = 1900$ мин⁻¹;
— — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс

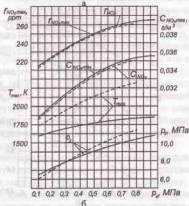
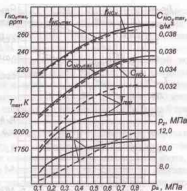


Рисунок 3.14 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{стр} = 11^\circ$:
 а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;
 — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Так, при работе по газодизельному процессу при $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 257 ppm и $0,0345 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 3 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 1900 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 11 градусов представлены на рис. 3.14, б. Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам также возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при $p_e = 0,92 \text{ МПа}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 263 ppm и $0,0350 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 2400 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 14 градусов представлены на рис. 3.15, а.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация NO_x , максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя.

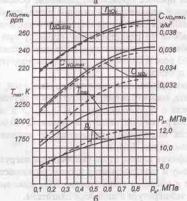
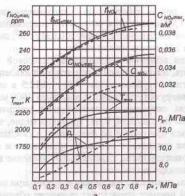


Рисунок 3.15 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$:
 а - $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

Так, при работе по газодизельному процессу при $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 265 ppm и $0,0350 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Графики объемного содержания, массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 1900 мин^{-1} и установочного угла опережения впрыскивания топлива 14 градусов представлены на рис. 3.15, б.

Из графиков видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота, максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя.

Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя. Так, при работе по газодизельному процессу при $p_e = 0,92 \text{ МПа}$ значения объемного содержания и массовой концентрации составляют 268 ppm и $0,0358 \text{ г/м}^3$, соответственно, что ниже на 2 % дизельного процесса.

Из графиков видно, что применение КПГ приводит к уменьшению максимальной концентрации оксидов азота в цилиндре дизеля. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11$ градусов и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание оксидов азота составляет 262 ppm , а по дизельному процессу 266 ppm , что на 1,5 % ниже.

3.4.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и га-

зодизельному процессам при установившемся угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр} = 8^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 3.16, а.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и максимального давления газов в цилиндре, увеличение максимальной температуры цикла. Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит уменьшение объемного содержания с 265 до 255 ppm и массовой концентрации оксидов азота с 0,0353 до 0,0342 г/м³. При переходе на газодизельный режим объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота ниже в среднем на 3% во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установившемся угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр} = 11^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 3.16, б.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит также снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и максимального давления газов в цилиндре, увеличение максимальной температуры цикла.

Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит уменьшение объемного содержания с 267 до 257 ppm и массовой концентрации оксидов азота с 0,0357 до 0,0344 г/м³. При переходе на газодизельный процесс объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота ниже в среднем на 3% во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

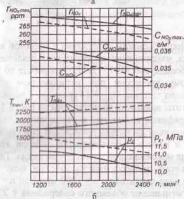
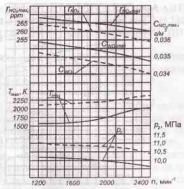


Рисунок 3.16 - Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения:

а — $\Theta_{впр} = 8^\circ$; б — $\Theta_{впр} = 11^\circ$; в — $\Theta_{впр} = 14^\circ$;

— — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

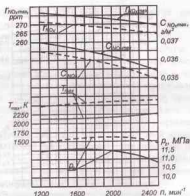


Рисунок 3.16, в

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 14$ градусов в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рис. 3.16, в.

Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре, увеличение максимальной температуры цикла. Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с $n = 1200$ мин⁻¹ до $n = 2400$ мин⁻¹ происходит уменьшение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота с 272 до 265 ppm и массовой концентрации оксидов азота с 0,0365 до 0,0351 г/м³.

При переходе на газодизельный режим объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота ниже в среднем на 3 % во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

4. РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АВТОБУСА ПАЗ-32054-12 С ДВИГАТЕЛЕМ Д-245.12С ДЛЯ РАБОТЫ ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ

4.1. Общие требования к системе подачи метановоздушной смеси во впускной трубопровод дизеля с турбонаддувом Д-245.12С автобуса ПАЗ-32054-12

При работе двигателя на метановоздушной смеси, воспламеняемой запальной порцией дизельного топлива, необходимо обеспечить универсальность работы двигателя, т.е. его работа должна осуществляться как по газодизельному циклу, так и по дизельному циклу, при этом не должно происходить потери мощности и перерывов в работе при переключении на другой вид топлива. Поэтому при разработке системы питания, предназначенной для подачи компримированного природного газа во впускной трубопровод, необходимо было учитывать следующие требования.

Во-первых, модернизация всережимного регулятора насоса не должна быть технологически сложной и дорогостоящей.

Во-вторых, изменения не должны коснуться конструкции самого двигателя.

В-третьих, при работе по газодизельному циклу мощностные параметры работы двигателя должны быть не ниже, чем при дизельном процессе.

В-четвертых, подаваемая метановоздушная смесь, независимо от режима работы двигателя, должна равномерно распределяться по всем цилиндрам двигателя.

В-пятых, установленное оборудование для подачи компримированного природного газа должно отвечать всем правилам техники безопасности, а также гарантировать высокую надежность и долговечность.

Метановоздушная смесь образуется в смесителе-дозаторе, установленном перед турбокомпрессором, который создает разрежение во впускном трубопроводе, в результате чего метановоздушная смесь поступает в цилиндры двигателя.

Запуск двигателя осуществляется на дизельном топливе, а затем включается подача КПГ с помощью блока переключателя

вида топлива, установленного на панели приборов. В дальнейшем работа двигателя на всережимной характеристике обеспечивается регулированием подачи КПП дозирующим устройством, непосредственно связанным с всережимным регулятором насоса.

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

Модернизация автобуса ПАЗ-32054-12 с измененной системой питания для работы на сжатом природном газе была осуществлена в Вятской ГСХА на базе опытного учебного хозяйства «Чистые пруды» при содействии ООО «Волготрансгаз» Кировского ЛПУМГ. Опытный образец автобуса оснащен серийной газобаллонной аппаратурой.

Баллон общим объемом 315 литров, изготовленный из высокопрочного металлопластика (рис. 4.1), установлен под задним сидением автобуса. Крепление баллона осуществляется с помощью кронштейнов, установленных над лонжеронами рамы (рис. 4.2). Баллон устанавливается так, чтобы выходные штуцера вентилей были горизонтальны, а маховик был наверху (рис. 4.4).

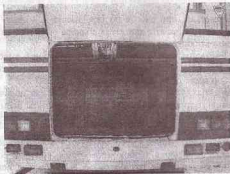


Рисунок 4.1 - Общий вид на баллон высокого давления объемом 315 литров, установленный под задним сидением автобуса

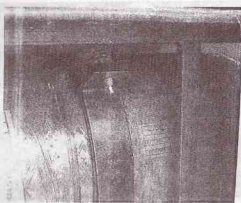


Рисунок 4.2 - Вид на крепление баллона высокого давления



Рисунок 4.3 - Вид на вентиль баллона высокого давления

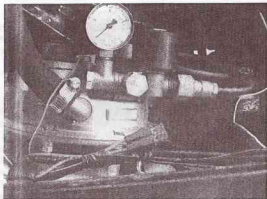


Рисунок 4.4 - Вид на трехступенчатый газовый редуктор-подогреватель

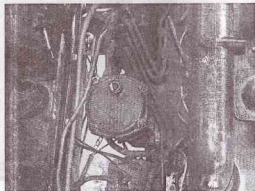


Рисунок 4.5 - Вид на шланг для подвода природного газа

Распределительная крестовина с заправочным устройством размещена слева в отсеке ресивера и тормозных кранов. Трехступенчатый газовый редуктор-подогреватель «Landi Renzo» устанавливается на боковой стенке моторного отсека (рис. 4.4).

Внесены некоторые конструктивные изменения во всежимный регулятор частоты вращения дизеля, они не являются технологически сложными и требующими больших финансовых вложений. Это позволяет при работе по газодизельному процессу замещать до 85 % дизельного топлива КПГ. Величина запальной порции дизельного топлива не изменяется в зависимости от режимов работы двигателя и составляет 12 мм³/цикл. Вносимые изменения никак не сказываются на ресурсе топливного насоса.

Таблица 4.1 - Техническая характеристика автобуса ПА3-32054-12

Показатель	Величина
1. Рабочий объем двигателя, л	4,75
2. Число цилиндров	4
3. Степень сжатия	16
4. Диаметр поршня, мм	110
5. Ход поршня, мм	125
6. Тип системы охлаждения	жидкостная
7. Марка турбокомпрессора	ТКР-6
8. Номинальная мощность, кВт (л.с.)	80 (109)
9. Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2400
10. Расход газа на номинальном режиме:	
- природного газа, кг/ч	14
- дизельного топлива, кг/ч	3
11. Суммарный запас газа, м ³	60
12. Давление газа в баллоне, МПа	19,6
13. Количество баллонов, шт.	1
14. Масса баллона, кг	236,5
15. Снижение выбросов токсичных компонентов (на номинальном режиме), %	
- оксидов азота	8
- СО	19
- сажи	96
16. Запас хода при работе на природном газе, км	270
17. Запас хода при работе на дизельном топливе, км	525

4.3. Оценка экономической эффективности использования природного газа в качестве моторного топлива в автомобильном дизеле 4ЧН 11,0/12,5

Оценка экономической эффективности применения компримированного природного газа в качестве моторного топлива с экономической точки зрения является проблематичной в связи с тем, что отсутствует единая методика, регламентирующая проведение комплексной оценки экономической эффективности при использовании альтернативных топлив. При этом она должна быть осуществлена на основе всестороннего обобщения результатов исследований [142]. Поэтому необходимо учитывать снижение содержания токсичных компонентов в ОГ, разницу в стоимости традиционного и альтернативного топлива, стоимость дополнительного оборудования и приспособлений, влияние на показатели надежности двигателя.

При рассмотрении токсичности ОГ двигателя необходимо учитывать вклад различных составляющих ОГ в общую суммарную токсичность, а также то, какие из них представляют наибольшую опасность. Поэтому оценка вредности выбросов двигателя, определение наиболее токсичных компонентов ОГ и сравнение эффективности предложенных мероприятий с экологической точки зрения тоже достаточно затруднительно. Для решения этих задач обычно вводят понятие суммарной (приведенной) токсичности ОГ двигателя.

Для определения экономического эффекта использования КПГ в качестве топлива нами предлагается использовать «Временную типовую методику определения экономической эффективности осуществления природоохранительных мероприятий» [137].

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

$$O = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot B, \quad (4.1)$$

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

$$B = \frac{M}{\sum m_i}, \quad (4.2)$$

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

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

Приведенный выброс M i -го компонента ОГ определяется по формуле

$$M = A_i \cdot m_i,$$

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

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

Эта методика дает алгоритм определения этих показателей для компонентов ОГ. При этом в качестве базового загрязнителя принят оксид углерода. Принимаем показатель его агрессивности равным единице. Показатели же для других компонентов указывают, во сколько раз при одинаковых условиях ущерб, наносимый рассматриваемым загрязнителем, больше ущерба, наносимого оксидом углерода.

Соответственно, A_1 относительной агрессивности компонентов ОГ принимается: $A_{CO} = 1$; $A_{NOx} = 41,1$, $A_{CH} = 3,16$, $A_C = 200$.

Принимая значения постоянных величин по рекомендациям [143], 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 (4.1), выполненный для автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 автобуса ПАЗ-32054-12, 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 около 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, на затраты на КПГ на 100 км составят

$$24 \cdot 6,50=156 \text{ руб.}$$

Итого стоимость затрат на топливо при работе двигателя по газодизельному процессу составит

$$128+156=284 \text{ руб./100 км.}$$

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 $22800+19676=42476$ руб.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1985. – 120 с.
- Сердюк О.В. Экология и автомобилестроение // Автостандарт.- 2004. - № 4. – С.18-23.
- Кульчицкий А.Р., Эфрос В.В. Транспорт и «парниковые газы» // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 6. – С. 5-8.
- Филиппов А.З. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей. – Киев: Вища школа, 1980. – 160 с.
- Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
- Казakov Н.А., Масленникова А.П. Экологическая безопасность транспорта // Автобизнесмаркет. – 2004. - № 14. – С. 4-7.
- Филиппов А.З., Кратко А.П., Мазин М.В. Пути снижения вредных выбросов отработавшими газами автомобильных двигателей. – М.: НИИавтопрм, 1979. – 64 с.
- Николаенко А.В., Салова Т.Ю., Шкрабак В.С. Состояние и некоторые пути улучшения экологических показателей сельскохозяйственных тракторов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. между. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 57-58.
- Thomas C. E., James B. D., Somas F. D. Mr., Kuhn I. F. Mr. // Int. hydrogen Energy. 2000. ol. 25. P. 551.
- Озимов П.Л., Валын В.К. Развитие конструкции дизелей с учетом требований экологии // Автомобильная промышленность. – 1998. - № 11. – С. 31-32.
- ГОСТ Р 41.49-2003 (Правила ЕЭК ООН № 49). Единоеобразие предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ. – М.: Изд-во стандартов, 2004. - 180 с.
- Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей: - М.: Легпром-Автодата, 2001. - 80 с.: ил.
- Звонов В.А., Козлов А.В., Кутнев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. – НАМИ, 2001. - 248 с.
- Титков А.И. Стратегия развития автомобильной промышленности // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 2. – С. 1-4.

- Салова Т.Ю. Моделирование и исследование процессов образования и нейтрализации оксидов азота дизелей. – С. – Петербург: Индикатор, 1998. – 80 с.
- Иоун К.С. Очистка дымовых газов от окислов азота // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1980. - № 3. – С. 149-154.
- Самойлов Н.П., Игонин В.И. Токсичность автодвигателей и способы ее снижения. – Казань: КГУ, 1997. – 170 с.
- Говорущенко Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. – М.: Транспорт, 1990. – 135 с.
- Концепция управления экологической безопасностью АТС / А. П. Гусаков, М. Е. Вайсблом, В. В. Донченко, Ю. И. Кузин // Автомобильная промышленность. 1999. - № 3. – С.8-11.
- Яковлев А. И., Найденов А. А. Взгляд на перспективы развития энергетических установок автомобилей // Автостроение за рубежом. - 1998. - № 10. – С.11-12.
- Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / Учеб. пособие. - М.: Изд-во РУДН, 1998. – 214 с.
22. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAE № 11(19) (2004)
- Appley A. The Electrochemical Engine for vehicles // Scientific American. July 1999.
- Карицкий В.В., Валеев Д.Х., Фучкин С.В. Опыт эксплуатации газодизельных КамАЗов // Автомобильная промышленность. – 1992. - № 8. – С. 20-21.
- Дубинский В.Н. Альтернативные методы нейтрализации отработавших газов дизелей // Двигателестроение.-1992.- № 5.-С.10-11.
- Титков А.И. От концепции – к стратегии развития автомобильной промышленности в первой четверти XXI века // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 2. – С. 1-4.
- Сорокин А. И., Мирзоев Г. К. Сравнительный анализ автомобильных двигателей внутреннего сгорания и энергоустановок на топливных элементах // Тез. докл. II Всерос. семинара «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 2003.
- Булаев В.Г. Снижение токсичности тепловых дизелей // Железнодорожный транспорт. - 1993. - № 10. - С. 45-48.
- Толшин В.И., Чуб Т.В., Якуничков В.В. Рециркуляция ОГ как средство снижения оксидов азота судового дизель-генератора // Двигателестроение. – 2000. - № 4. – С. 20-21.
- Лиханов В.А., Лопатин О.П. Эффективность применения рециркуляции охлажденных отработавших газов для снижения эмиссии оксидов азота в отработавших газах дизеля 4С 11,0/12,5 при работе на сжатом природном газе // Улучшение технико-эксплуатационных показателей

- мобильной техники; *Материалы 13-ой науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья*. - Н. Новгород: НГСХА, 2003. - С. 109-114.
31. Научный электронный журнал КубГАУ. - 2004. - № 05(7).
32. Гетьманец Г.В., Лиханов В.А. Социально – экологические проблемы автомобильного транспорта. – М.: Аспол, 1993. – 330 с.
33. Лиханов В.А. Вместо дизтоплива - природный газ // *Сельский механизатор*. - 1996. - № 11. - С. 28.
34. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Колос, 1994. - 224 с.: ил.
35. Тарасов Е.М. Альтернативные виды топлива для дизельного подвижного состава // *Железные дороги мира*. - 1998. - № 2. - С.28-33.
36. Истомин С.В., Стрельников В.А. Новые направления повышения экологической безопасности ДВС // *Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей*: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 191 - 192.
37. Чичин А.В. Природу защитит // *Локомотив* – М. - 2001. - № 2. - С.37-40.
38. Захаров А. И., Иванков В.В. и др. Разработка комбинированного топливоводородного питания для улучшения экологических характеристик автомобиля // *Альтернативная энергетика и экология*. - 2002. - № 2. - С. 13.
39. Мищенко А. И., Белогуб А. В. Применение водорода для двигателей автомобильного транспорта // *Атомо-водородная энергетика и технологии*: Сб. статей. - 1998. - Вып. 8.
40. Лиханов В.А. Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей. – Киров: Вятская ГСХА, 2002. - 280 с.
41. Лиханов В.А. Сгорание и сажеобразование в цилиндре газодизеля. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. - 104 с.: ил.
42. Михайлов В.А., Трелина К.В. Снижение токсичности выбросов дизельных тракторов малых классов. // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. - 2003. - №3. - С. 18 – 20.
43. Говорушенко, Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. - М: Транспорт, 1990. - 135 с.
44. Дюкова Е.А. Экологическая безопасность - направление стратегическое // *Автомобильный транспорт*. – 1999. - № 4. – С. 10-11.
45. Николаенко А.В., Салова Т.Ю. Моделирование и создание средств нейтрализации отработавших газов автотракторных дизелей // *Двигателестроение*. – 2000. - № 2. - С.39-41.
46. Шкрябак В.С., Николаенко А.В., Капустин А.А. Экономия жидкого дизельного топлива путем перевода дизелей на газодизельный процесс // *Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей*: Сб. науч. тр. межд. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 2002. - С. 30-42.
47. Фучин С.В. Перевод двигателя на газодизельный процесс // *Автомобильная промышленность*. – 1999. - № 2. – С. 24-27.

48. Создание макетного образца трактора Т-25А для работы на газе качестве моторного топлива: Отчет о НИР (заключительный) / Киров, с. - х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. № ГР 0186.0037397. - Киров, 1987. - 57 с.
49. Создание газодизеля Д-144 для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с.х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - № ГР 0188.0059777. - Киров, 1988. - 54 с.: прилож.
50. Создание макетного образца трактора «Универсал-445» для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с.х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - № ГР 0188.0059778. - Киров, 1990. - 65 с.: прилож.
51. Создание макетного образца погрузчика для работы на сжатом природном газе: Отчет о НИР / Киров, с. - х. ин-т; Руковод. В.А. Лиханов. - Киров, 1991. - 68 с.: прилож.
52. 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.
53. 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.
54. Лиханов В.А. Разработка и создание семейства газобаллонных тракторов и погрузчиков для работы на сжатом природном газе // *Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий Евро-Северо-Востока России*: *Материалы II - ой Межд. науч.-практ. конф.* В 3 т. - Киров, 2001. - Т. 3. - С. 98-108.
55. Исследование рабочих процессов в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 / Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р., Лопатин О.П., Вылегжанин П.Н. // *Монография*. – Киров: Вятская ГСХА, 2004. - 330 с.
56. Газобаллонные автомобили / Григорьев Е.Г., Колубаев Б.Д., Ерхов В.И., Зубарев А.А. – Машинностроение, 1989. – 216 с.
57. Минкин И.М., Карнищев В.В. Газодизель – силовая установка XXI века // *Автомобильная промышленность*. – 2002. - № 5. – С. 4-8.
58. Титков А.И. Природный газ – моторное топливо XXI века // *Автомобильная промышленность*. – 1998. - № 2. – С. 26-29.
59. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский. – М.: Недра, 1996. – 237 с.
60. Lugas G.C., Varde K.S. Off-stoichiometry operation of an si engine amodel of formation and control of nitric oxide // *SAE Techn. Pap. Ser.* - 1976. - № 750352.-9 p.
61. Салова Т.Ю. Экологический мониторинг окружающей среды при

- эксплуатации автотракторной техники. – С. – Петербург: Индикатор, 1998. – 80 с.
62. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефья, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
63. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. – М.: Колос, 1984. – 335 с.: ил.
64. Вольская Н.А., Новиков Л.А., Хинчук Г. Моделирование рабочего процесса и эмиссии оксидов азота (NO_x) малотоксичного дизеля с рециркуляцией отработавших газов, обогащенных кислородом // Двигателестроение. – 1996. – № 1. – С. 13-18.
65. Батурин С.А., Лоскутов А.С., Алин Ж.К. Исследование процессов образования оксидов азота в быстроходном дизеле автотракторного типа // Рабочие процессы и усовершенствование теплотехнических устройств и электрических систем: Сб. науч. тр. – Алма-Ата: КазПИ, 1981. – Вып. 13. – С. 68-73.
66. Малов Р.В., Никонов С.В. Снижение образования оксидов азота в цилиндрах дизелей изотермического подвижного состава // Эффективность ДВС / Сб. науч. трудов. – М.: ВЗМИ, 1981. – С. 67-77.
67. Розенфельд Э.И. Горелочные устройства для сжигания газа и других видов топлива с минимальным содержанием оксидов азота в уходящих газах тепловых агрегатов. – М.: ВНИИГазпрм, 1975. – 46 с.: ил.
68. Зельдович Я.Б., Садовников П.А., Франк – Каменский Д.А. Окисление азота при горении. – М. – Л.: АН СССР, 1947. – 148 с.
69. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива. – М.: Наука, 1971. – 272 с.
70. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
71. Нотыч А.Г., Пайкратов В.Ф. – В кн.: Образование оксидов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу. – Киев: Наукова думка, 1979. – С. 93-101.
72. Ветрова Н.В., Померанцев В.В., Дульнева Л.Т. Приближенная теория образования оксидов азота в топках парогенераторов // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: Сб. науч. тр. – Л.: ЛПИ, 1977. – Вып. 2. – С. 38-40.
73. Khan J.M., Greeves G., Wang C.H. Factors affecting smoke and gaseous emissions from direct injection engines and a method of calculation // SAE Techn. Pap. Ser. – 1973. – № 730169. – 23 p.
74. Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четвертушкин Б.И. Химическая кинетика образования оксидов азота при горении. – М.: Наука, 1974. – 146 с.
75. Fenimore C.P. Development of a system for methane operation in a four cylinder light duty diesel engine. – Pittsburgh: Combustion Inst, 1982. – 89 p.

76. Райзер Ю.П. Образование оксидов азота в ударной волне при сильном взрыве в воздухе // Журнал физической химии, 1959. – Т. 33. – № 3. – С. 700-709.
77. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива. – М.: Наука, 1971. – 272 с.
78. Франк-Каменский Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 367 с.
79. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. – P. 2. – Pittsburgh: Combustion Inst, 1971. – 102 p.
80. Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четвертушкин Б.И. Химическая кинетика образования оксидов азота при горении метана в воздухе. М.: Всес. Центр. Model. АН СССР. – № 25. – 1992. – 48 с.
81. Семенов Н.Н. Развитие цепных реакций и теплового воспламенения. – М.: Знание, 1969. – 94 с.
82. Гурвич Н.А., Лавренцев Е.М. Определение температуры горения по содержанию оксидов азота и градиенту температуры в продуктах сгорания // Образование оксидов азота в процессах горения и пути снижения их выброса в атмосферу: Сб. науч. тр. – Киев: Знание, 1974. – С. 16-19.
83. Лавров Н.В. и др. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Мир, 1981. – 240 с.
84. Варнац Ю., Маас У., Диббл Р. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: Физматлит, 2003. – 351 с.
85. Шоу Г. Уменьшение выбросов оксидов азота из газотурбинной камеры в результате модификации топлива // Энергетические машины и установки. – М.: Мир, 1973. – № 4. – С. 87-94.
86. Исет В. Взрывы и горение в газах. – М.: ИЛ, 1952. – 687 с.
87. Make P.C., Pratt D.T. The role of energy-releasing kinetics in NO formation: fuel-lean jet-stirred CO – air combustion // Combustion science and technology. – 1974. – V. 9. – № 5/6. – P. 221-231.
88. Сигал И.Я. К вопросу образования оксидов азота в процессах горения // Образование оксидов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу: Сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1979. – С. 3-7.
89. Lavoie G.A., Heywood J.B., Keck J.C. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines // Combustion science and technology. – 1970. – V. 1. – № 4. – P. 313-326.
90. Гурвич А.М., Шаулов Ю.Х. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. – М.: МГУ, 1995. – 167 с.
91. Смайлис В.И. Теоретические и экспериментальные основы создания малотоксичных дизелей: Дисс. ... докт. техн. наук / Ленингр. политехн. ин-т. – Л., 1988. – 464 с.: ил.

92. Ловачев Л.А. Кинетика образования NO_x в метановоздушных пламенах // Химическая физика, 1983. - № 8 - С. 1085-1091.
93. Сигал И.Я., Гуревич Н.А., Ларенцов Е.М. Образование окислов азота при ламинарном и турбулентном горении // Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1975. - Т. 4. - С. 513-521.
94. Нельсон Н. Образование окиси азота при горении // Ракетная техника и космонавтика. - 1976. - Т. 14. - № 9. - С.30-36.
95. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
96. Сигал И.Я. Образование окислов азота при сжигании топлива // Окислы азота в продуктах сжигания топлива: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 3-16.
97. Льюис З.Б., Элибе Г. Горение пламени и взрывы в газах. - М.: Мир, 1968. - 580 с.
98. Матвеевский Д.Д., Сеначин П.К., Сиваула А.Е. Моделирование жесткой работы газодизеля как задачи о самовоспламенении локального объема // Двигателестроение. - 1998. - № 4. - С. 16-18.
99. Сигал И.Я., Гуревич Н.А., Ляхоронский В.Г. Исследование минимального выхода окислов азота в пламенах метана, окиси углерода и водорода // Использование газа в народном хозяйстве. - 1980. - № 2. - С. 23-27.
100. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. - Л.: Недра, 1975. - 391 с.
101. Глестон С., Лейдлер К., Эйринг Г. Теория абсолютных скоростей. - М.: Изд-во ин. лит., 1948. - 580 с.
102. Сигал А.И. Предотвращение образования диоксида азота в отопительных котлах: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - Л., 1985. - 24 с.
103. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Ред. Н.А. Чигир. - М.: Машиностроение, 1981. - 407 с.
104. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. - Л.: Недра, 1986. - 280 с.
105. Льюис З.Б., Элибе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. - М.: Изд-во ин. лит., 1948. - 447 с.; 2-е изд. - М.: Мир, 1968. - 592 с.
106. Чертков Я.Б. Неуглеводородные соединения в нефтепродуктах. - М.: Химия, 1964. - 283 с.
107. Хаустович Г.П. Методы подавления процессов образования окислов азота в топках устройствах, сжигающих газ. - М.: Информэнерго, 1976. - 50 с.; ил.
108. Щетников Е.С. Физика горения газов. - М.: Наука, 1965. - 740 с.
109. Ramsey David. Propane for diesel fuel system // Diesel Progr. N.Amer. - 1983. - № 3. - 27 p.
110. Ветрова Н.В., Померанцев В.В., Дульнева Л.Т. Приближенная теория образования окислов азота в топках парогенераторов //

- Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: Сб. науч. тр. - Л.: ЛПИ, 1977. - Вып. 2. - С. 38-40.
111. Росляков П.В. Расчет образования топливных окислов азота при сжигании азотсодержащих топлив // Теплоэнергетика. - 1986. - № 1. - С. 37-41.
112. Чесноков С.А. Сокращенный механизм горения метана в условиях ДВС // Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотранспортных средств: Материалы 9-ой Международ. науч. - практ. конф. - Владимир, 2002. - С. 319-322.
113. Лиханов В.А., Девягтыров Р.Р., Лопатин О.П. Феноменология горения дизельного топлива, впрыскиваемого через многорычную форсунку в МВС цилиндра газодизеля // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межауз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская академия транспорта, Вятская ГСХА, 2003. - С. 46-52.
114. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. - Л.: Недра, 1975. - 391 с.
115. Автомобиль ЗИЛ-138А и его модификации - М.: Машиностроение, 1989. - 350 с.
116. Морев А.И., Плеханов И.П. Устройство и обслуживание газобаллонных автомобилей. - М.: ДОСААФ, 1987. - 141 с.
117. Система АСГА-Т. Руководство по эксплуатации. АПИ 2.950.003 РЭ. - Смоленск, 1984. - 81 с.
118. Система АСГА-Т. Нормативные требования. АПИ 2.950.003. - Смоленск, 1984. - 50 с.
119. Система АСГА-Т. Формуляр. АПИ 2.950.003ФО. - Смоленск, 1984.
119. Ложкин В.Н. Испытания автомобилей в условиях производства и эксплуатации: испытания транспортных средств применительно к оценке экологических характеристик // Справочно-методическое и учебное пособие. - СПб.: НИК Атмосфера при ГТО им. А.И. Воейкова, 2003. - 300 с.
120. Николаенко А.В., Капустин А.А. Особенности использования природного газа в качестве топлива для транспортных двигателей // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2006. - С. 28-33.
121. 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. Видельский и др. - М.: Экономика, 1986. - 96 с.
122. Даниел К. Применение статистики в промышленном эксперименте. - М.: Мир, 1979. - 299 с.

123. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. - Л.: Наука, 1967. - 88 с.
124. Кассасирова О.И., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Наука, 1970. - 104 с.
125. Шевшиков А. А. Основы теории ошибок. - Л.: Изд. - во Ленинградского ун-та, 1972. - 122 с.
126. Закигаев Л.С., Кипьян А.А., Ромашков В.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
127. Веденин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. - М.: Колос, 1973. - 199 с.
128. Райков И.В. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - М.: Высшая школа, 1975. - 320 с.
129. Литта Т.М., Хиллз Ф.Дж. Сельскохозяйственное дело. Планирование и анализ: Пер. с англ. - М.: Колос, 1981. - 320 с.
130. Барра Ж.Р. Основные понятия математической статистики. - М.: Мир, 1974. - 275 с.
131. Матвеевский Д.Д., Сеначин П.К., Самстула А.Е. Моделирование жесткой работы газодизеля как задачи о самовоспламенении локального объема // Двигателестроение. - № 4 (194). - 1998. - С. 16-18.
132. Ефремов И.Ф., Матвеевский Д.Д. Метод анализа топливной экономичности поршневых ДВС // Двигателестроение. - 1986. - № 10. - С. 3.
133. Рабочие процессы ДВС: Учебное пособие / Под ред. В.А. Вагнера, Н.А. Иващенко, Д.Д. Матвеевского. - АлтГТУ им. И.И. Ползунова-Барнаула, 1995. - 185 с.
134. Гуренич Н.А., Лавренцев Е.М. Определение температуры горения по содержанию окислов азота и градиенту температуры в продуктах сгорания // Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения их выброса в атмосферу: Сб. науч. тр. - Киев: Знание, 1974. - С. 16-19.
135. Звонов В.А., Фурса В.В. Методика расчета окислов азота в цилиндре дизеля // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков: ХГУ, 1976. - Вып. 24. - С. 107-115.
136. Фесенко П.П., Звонов В.А., Рыбальченко А.Г. Исследование процесса каталитического восстановления окислов азота в отработавших газах дизеля // Окислы азота в продуктах сжигания топлив: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 149-154.
137. 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.
138. Федоров Н.А. Техника и эффективность использования природного газа в промышленности. - М.: ВНИИЭГ газпром, 1970. 94 с.
139. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 2002. - 496 с.: ил.

140. Равкинд А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели. - М.: Недра. - 1976. - 196 с.
141. Гоц А.Н., Мадаренко И.П., Мокеева В.Н. Тенденции развития автомобильных и тракторных дизелей за рубежом // Двигателестроение. - 1992. - № 8-9. - С. 65-67, 80.
142. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. - Л.: Недра, 1966. - 327 с.
143. Черток Я.Б. Моторные топлива. - Новосибирск: Наука, 1987. - 206 с.
144. Фастовский В.Г. Метан. - М.: Гостопиздат, 1947. - 153 с.
145. Николаенко А.В., Салова Т.Ю. Математическая модель образования и методика расчета концентрации окислов азота в дизелях // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. - С-Петербург: СПбГАУ, 1999. - С. 15-26.
146. Нижник С.С. Выброс окислов азота энергетическими котлами при сжигании топлив, содержащих химически связанный азот // Окислы азота в продуктах сгорания топлив: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 63-69.
147. Звонов В.А. Методика расчета образования окислов азота в цилиндре карбюраторного двигателя // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. - Харьков: ХГУ, - 1977. - Вып. 27. - С. 65-70.
148. Кульчинский А.Р. Разработка модели и исследование образования окислов азота в дизеле: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / МАДИ. - М., 1982. - 16 с.
149. Николаенко А.В., Салова Т.Ю. Моделирование кинетики образования окислов азота в дизелях // Двигателестроение. - 1998. - № 1. - С. 35-37.
150. Салова Т.Ю. Моделирование процессов нейтрализации окислов азота в различных условиях сгорания топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 84-89.
151. Лиханов В.А., Рудаков Л.В. Особенности турбулентного горения метано-воздушной среды в цилиндре газодизеля с турбонаддувом // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Междуз. сб. науч. тр. - С-Петербург - Киров: РАТ, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 51-65.
152. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многотопливных газодизельных двигателей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 296 с.
153. Шкалинова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях. - М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. - 64 с.
154. Мамедова М.Д., Васильев Ю.Н. Транспортные двигатели на газе. - М.: Машиностроение, 1994. - 224 с.

155. Кратко А.П., Филиппинц Т.Р. Перспективы автомобильных газодизелей // Автомобильная промышленность. – 1994. - № 2. – С. 9-12.
156. Кариницкий В.В., Тер-Миртичанян Г.Г. Газодизельные автомобили НАМИ // Автомобильная промышленность. – 1993. - № 10. – С. 27-30.
157. Кутнев В.Ф., Каменев В.Ф., Никитин И.М., Экологически чистые альтернативные топлива. Перспективы применения // Автомобильная промышленность. – 1997. - № 11. – С. 24-25.
158. Кутнев В.Ф., Звонов В.А., Корнилов Г.С. Научно-технические проблемы улучшения экологических показателей автотранспорта // Автомобильная промышленность. – 1998. - № 11. – С. 7-11.
159. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Экология: Альтернативные топлива. Перспективы применения // Автомобильная промышленность. – 2001. - № 4. – С. 10-12.
160. Гусаров А.П., Вайсблом М.Е., Соколов М.Г. Газ как средство требований «Евро-2» // Автомобильная промышленность. – 1997. - № 11. – С. 27-29.
161. Долганов К.Е., Пляков А.П., Парсаданов И.В. Газовые двигатели с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. – 1996. - № 2. – С. 6-8.
162. Гуляев С.А. Сжатый газ как моторное топливо // Автомобильная промышленность. – 1995. - № 2. – С. 28-30.
163. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Математическая модель для расчета скоростей реакций образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Роль науки в формировании специалиста: Сб. тр. науч. – практ. конф., Вып. 4. – М.: Изд-во МГОУ, 2006. – С. 43-47.
164. Ермолович И.В., Носков Н.И., Тимофеев В.Е. Перспективный малотоксичный дизель с двухстадийным способом смесяобразования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. - № 2. - С. 20-22.
165. Матиевский Д.Д., Сингула А.Е., Севинян П.К. Задержка воспламенения двухкомпонентного топлива в газодизеле и в дизеле, работающем на спиртах: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Двигатель-97». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. - С. 116-118.
166. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей О.И. Жегалин, Н.А. Китросский, В.И. Панчиный и др. – М.: Машиностроение, 2002. – 97 с.
167. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Образование и нейтрализация оксидов азота в цилиндре газодизеля: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2004. – 106 с.
168. Катализаторы горения для бензиновых и дизельных топлив / Д.В. Сердюк, В.В. Сердюк, Л.А. Алшкина, А.М. Данилов // Автомобильная промышленность. – 2001. - № 5. - С. 23-24.

169. Кузнецов И.В. Экологические показатели серийного форкамерного ДВС: резервы улучшения // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 4. – С. 9-11.
170. А.с. 953234 СССР, МКИ F01N3/02. Жидкостный очиститель газов / В.Е. Васильковский (СССР). - 3 с.
171. Линчак И.Ф. Охрана окружающей среды. – М.: Недра, 1995. – 270 с.
172. Лебедев С.В. Выбор основных параметров конструкции и регулирования дизельных типоразмера с учетом ограничения эмиссии NO_x в ОГ // Двигателестроение. – 1996. - № 1. - С. 34-36.
173. Макаров В.А., Шатров В.И. Показатели дизеля при совместном управлении топливно- и воздухоподачей // Автомобильная промышленность. – 1998. - № 6. - С. 10-11.
174. Вейнблат М.Х. Разработка малотоксичных модификаций дизелей ДМ-21А (Тезисы доклада) // Двигателестроение. – 1994. - С. 43.
175. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Математическая модель для расчета скоростей реакций образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Роль науки в формировании специалиста: Сб. тр. науч. – практ. конф. – Вып. 4. – М.: Изд-во МГОУ, 2006. – С. 43-47.
176. Лиханов В.А., Лопарев А.А., Рудаков Л.В. Исследование процессов сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 129 с.
177. Лиханов В.А., Мохиткин В.Г., Россохин А.В. Исследование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН11,0/12,5 при работе на природном газе: Монография. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 124 с.
178. Адамович Б.А. Каталитические нейтрализаторы отработавших газов и экологическая безопасность АТС // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 1. – С. 9-11.
179. Улучшение экологических показателей дизеля с турбонадувом путем применения природного газа / В.А. Лиханов, А.В. Россохин, М.А. Олейник, Л.В. Рудаков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. - № 9. – С. 8-10.
180. Особенности химизма и феноменологии образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонадувом 4ЧН11,0/12,5 при работе на природном газе / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, М.А. Олейник // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. - № 11. – С. 13-16.
181. Анализ скоростного режима работы газодизеля 4ЧН11,0/12,5 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: Междуз. сб. науч. тр. – С. – Петербург: Киров: Росийская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 75-81.

182. 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.
183. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Влияние различных факторов на содержание оксидов азота в отработавших газах дизелей // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2004. - Вып. 3. - С. 87-90.
184. Лопатин О.П., Россохин А.В., Олейник М.А. Индикаторные диаграммы тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе с рециркуляцией 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.
185. Лопатин О.П., Олейник М.А. Особенности процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с наддувом при работе с рециркуляцией отработавших газов // Науке нового века - знания молодых: Материалы 4-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2004. - С. 101-103.
186. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Исследование показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при работе с рециркуляцией ОГ на номинальном режиме // Совершенствование конструкции, теории и расчета тракторов, автомобилей и двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. юбилейной XV региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2004. - С. 97-99.
187. Олейник М.А. Эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных нагрузочных режимах на максимальном крутящем моменте и номинальной частоте вращения // Образование. Наука. Производство. Инновационный аспект: Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Чебоксарского ин-та (фил.) МГОУ. - Вып. 3. В 2-х томах. - М.: Изд-во МГОУ, 2005. - Т. 1. - С. - 167-168.
188. Олейник М.А. Снижение содержания оксидов азота на двигателях с турбонадувом путем применения рециркуляции отработавших газов // Науке нового века - знания молодых: Материалы. 5-й науч. конф. аспирантов и соискателей. - Киров: Вятская ГСХА, 2005. - С. 136-139.
189. Россохин А.В., Олейник М.А., Рудахов Л.В. Проведение стендовых испытаний автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с турбонадувом //

- Материалы IV Международной науч.-практ. конф. «Автомобиль и техносфера», Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 178.
190. Олейник М.А., Россохин А.В. Токсические показатели автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на компримированном природном газе // Повышение эффективности использования автотракторной и сельскохозяйственной техники: Межвуз. сб. науч. тр. XVI региональной науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Предуралья. - Пенза: ФГОУ ВПО Пензенская ГСХА, 2005. - С. 213-216.
191. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Теоретические предпосылки для расчета скорости реакций образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 40-51.
192. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Олейник М.А. Исследование содержания азота и динамики тепловыделения в цилиндре газодизеля 4ЧН 11,0/12,5 // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 137-140.
193. Олейник М.А. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах автомобильного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе по газодизельному циклу // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Межвуз. сб. науч. тр. - С.-Петербург - Киров: Российская Академия транспорта, Вятская ГСХА, 2006. - Вып. 4. - С. 141-147.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	7
1.1. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду	7
1.2. Методы снижения содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей	10
1.3. Образование оксидов азота при сгорании природного газа и дизельного топлива в дизелях с турбонаддувом	17
1.3.1. Образование термических оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив	19
1.3.2. Образование оксидов азота из геммоксида азота в процессе горения углеводородных топлив	25
1.3.3. Образование быстрых оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив	27
1.3.4. Образование топливных оксидов азота в процессе горения углеводородных топлив	30
2. ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ	33
2.1. Уточненный химикм процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе	33
2.2. Статистическая модель для уточнения расчета скоростей реакций образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе	41
2.3. Уточненная зонаная модель процесса образования оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе	53
3. УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ	57
3.1. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	57
3.1.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	57
3.1.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	61

3.2. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки	64
3.2.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки	64
3.2.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки	67
3.3. Влияние применения природного газа на эффективные и токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала	72
3.3.1. Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала	72
3.3.2. Влияние применения природного газа на токсические показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала	76
3.4. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5	79
3.4.1. Влияние применения природного газа на индикаторные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ	79
3.4.2. Влияние применения природного газа на характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах	91
3.4.3. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения	97
4. РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АВТОБУСА ПАЗ-32054-12 С ДВИГАТЕЛЕМ Д-245.12С ДЛЯ РАБОТЫ ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ	101
4.1. Общие требования к системе подачи метановоздушной смеси во впускной трубопровод дизеля с турбонаддувом Д-245.12С автобуса ПАЗ-32054-12	101
4.2. Разработка и создание макетного образца автобуса ПАЗ-32054-12 для работы природном газе	102

4.3 Оценка экономической эффективности использования природного газа в качестве моторного топлива в автомобильном дизеле 4ЧН 11,0/12,5

ЛИТЕРАТУРА

106

110

Научное издание

**Лиханов Виталий Анятольевич,
Лопатин Олег Петрович,
Мохнаткин Виктор Германович,
Олейник Михаил Анятольевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ
ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДУВМО 4ЧН 11,0/12,5
ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Монография

Редактор А.В. Зверева