На правах рукописи

УДК 621.43.068

Голосов Андрей Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЯХ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОННОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

05.04.02 – тепловые двигатели

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2003

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре "Поршневые двигатели".

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Кавтарадзе Р.З.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор Патрахальцев Н.Н.

– кандидат технических наук Пономарев Е.Г.

Ведущая организация – НИИ Двигателей

1600050

Голосов А.С.
Разработка и экспериментальная проверка метода расчета концентраций оксидов азот...
2003 0-00

Зац ...003 г. В "15 30" ч. на заседании Диссерта... Тепловые и гидравлические машины" ... Технического Университета ...кая наб., д.2/18,

1600050

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

...теке МГТУ им.

...еренные печатью ...а, 2-я Бауманская ...Диссертационного

...умашев Р.

Актуальность проблемы. Токсичные вещества из различных источников наносят ущерб воздушному бассейну нашей планеты. Почти все средства современного транспорта загрязняют атмосферу, однако большая часть из них приходится на автомобили. Загрязнение атмосферного воздуха в результате работы автомобиля обусловлено тремя основными источниками: системой выпуска отработавших газов, системой смазки и вентиляции картера, системой питания. На долю выхлопных газов приходится наибольшая часть (70-80%) вредных веществ, выделяемых автомобильным двигателем.

В настоящее время задача усовершенствования двигателей внутреннего сгорания (ДВС), и в частности дизелей, приобретает характер поиска компромисса между двумя основными требованиями. С одной стороны, всемерное стремление к улучшению топливной экономичности, с другой стороны, жесткие ограничения, в виде нормативных документов и стандартов, на экологические характеристики двигателя.

Токсичность ДВС зависит от большого числа факторов (конструкционных, регулировочных, эксплуатационных параметров рабочего процесса), влияние которых сложно и противоречиво. Поэтому создание и использование адекватных математических моделей образования ВВ в цилиндре двигателя, на основе которых можно было бы проводить расчетные исследования, является весьма актуальным. Применение таких математических моделей позволит существенно сократить затраты на проведение исследований, так как при численном эксперименте отпадает необходимость в проведении довольно дорогостоящих испытаний двигателя и сборочно-разборочных работ на нем.

Цель работы. Разработка и экспериментальная проверка метода расчета локальных и суммарных концентраций оксидов азота, предназначенного для прогнозирования экологических характеристик проектируемых и для оценки уровня токсичности существующих двигателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- Разработка математической модели, алгоритма и программы для расчета локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме камеры сгорания.
- Разработка алгоритма и программы расчета локальных и суммарных концентраций оксидов азота на основе расширенного механизма Я.Б.Зельдовича.
- Экспериментальное исследование концентрации вредных веществ в выпускных газах дизеля на специальной опытной установке.
- Анализ полученных расчетно-экспериментальных результатов, оценка адекватности предложенных математических моделей и определение путей, направленных на улучшение экологических характеристик двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива.

Научная новизна. Разработан и экспериментально проверен метод расчета концентрации оксидов азота в продуктах сгорания двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива, который отличается от существующих тем, что:

- Учитывает локальное распределение впрыскиваемого топлива и на их основе локальные значения нестационарных температур рабочего тела в цилиндре.
- Позволяет рассчитать не только суммарные значения оксидов азота, но и локальные значения в цилиндре двигателя.
- Учитывает влияние на концентрацию оксидов азота таких факторов как давление впрыскивания топлива, количество сопловых отверстий, интенсивность закрутки потока впускного воздуха.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

◊ Применением фундаментальных законов и уравнений термодинамики, тепломассообмена и химической кинетики с соответствующими граничными условиями, современных численных и аналитических методов реализации математических моделей;

◊ Использованием при обосновании и оценке адекватности разработанных алгоритмов и математических моделей достоверных опытных данных, полученных на специальной установке в МГТУ им. Н.Э.Баумана с применением современной измерительной техники;

◊ Применением экспериментальных данных, полученных как в МГТУ им. Н.Э. Баумана, так и в других организациях, для подтверждения достаточной точности рассчитанных концентраций оксидов азота.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- Разработаны алгоритмы и программы, реализующие уточненные математические модели для расчета локальных концентраций оксидов азота в цилиндре двигателя, позволяющие с достаточной для практики точностью решать задачи оценки экологических характеристик проектируемых и существующих двигателей.
- Разработан относительно простой экспериментальный метод определения концентрации оксидов азота, который в совокупности с предложенной математической моделью позволяет сократить временные и материальные затраты при создании малотоксичных двигателей.

Апробация работы. Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» (Э2) МГТУ им. Н.Э. Баумана 4 июля 2002 г.

Основные разделы диссертационной работы были представлены: на юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры судовых ДВС Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 20 сентября 2000г; на 3-ей Всероссийской национальной конференции по теплообмену 21-25 октября 2002г., Москва, МЭИ; на заседаниях кафедры Э2 в 2000-2001 г.г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 4 печатных работах, а также в отчетах кафедры Э2 по НИР за 1999-2000 г.г.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 126 страниц основного

текста, 32 рисунка, 13 страниц со списком использованной литературы, включающим 125 наименований.

Содержание диссертации:

Во введении рассмотрены проблемы загрязнения воздушной среды вредными выбросами двигателей и обоснована актуальность расчета концентраций оксидов азота, как определяющего токсичного компонента в отработавших газах дизелей.

Приведена общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе приводится аналитический обзор экспериментальных и теоретических работ по исследованию токсичности в двигателях внутреннего сгорания, рассмотрены особенности образования оксидов азота в рабочем процессе двигателей, а также приведены методы определения нестационарных локальных температур в цилиндре, дается обзор известных работ, выполненных в различных странах мира. Общая теория образования оксидов азота разработана отечественными учеными Н.Н. Семеновым, Я.Б. Зельдовичем, Д.А. Франк-Каменецким, П.Я. Садовниковым и их учениками. Практическое применение для ДВС эта теория нашла в работах И.В. Астахова, Д.Д. Брозе, А.Н. Воинова, Д.Н. Вырубова, В.А. Звонова, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, М.Г. Круглова, А.С. Лышевского, В.А. Маркова, В.З. Махова, Н.Н. Патрахальцева, М.Р. Петриченко, Н.Ф. Разлейцева, Ю.Б. Свиридова, Б.Н. Файнлейба, А.С. Хачияна, M. Arai, D.L. Baulch, F.V. Bracco, K. Pattas, P. Philips P., G. Sitkei G., A. Urlaub, G. Woschni, K.L. Wray, K. Zeilinger и их сотрудников.

Проведенный анализ опубликованных работ по исследованию образования оксидов азота в ДВС, а также потребности современного двигателестроения, определили конкретные задачи диссертационной работы, изложенные выше.

Во второй главе приведен метод расчета локальных температур рабочего тела в цилиндре двигателя с непосредственным впрыскиванием топлива на основе многозонной модели. При этом каждая зона

рассматривается как отдельный контрольный объем (КО), а камера сгорания (КС) представляется в виде конечного числа КО (рис.1). Здесь же выделяются отдельные участки тепловоспринимающих поверхностей основных деталей ДВС (поршень, гильза, крышка, клапан).

На первом этапе определения локальных нестационарных температур в камере сгорания дизеля моделируется распределение топлива в камере сгорания дизеля. Исследование процессов испарения и сгорания топлива в отдельных КО требует определения количества топлива, попадающего в него. Для этого требуется расчет геометрии топливного факела, его динамики и распределения концентраций по его сечениям. В современных двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива широкое использование находит закрутка потока в цилиндре. Поэтому при расчете распределения впрыскиваемого топлива по объему камеры сгорания было учтено влияние вихревого движения воздуха. При этом автор использовал алгоритм и программу, разработанную в МГТУ им. Н.Э. Баумана Р.З. Кавтарадзе и А.А. Скрипником. На рис.2 дана расчетная схема топливного факела в вихревом потоке воздуха. Переход от реального сечения факела к эквивалентному показан на рис.3. Эквивалентность в данном случае означает идентичность массового расхода топлива в этих сечениях.

В зависимости от интенсивности воздушного вихря определяется локальный характер распределения топлива по отдельным зонам.

Для расчета локальных температур используется многозонная модель, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в основе которой лежит метод контрольных объемов (МКО).

В результате внешних воздействий (тепло- и массообмен), а также вследствие происходящих процессов испарения и сгорания топлива внутри КО происходит изменение внутренней энергии рабочего тела, заключенного в данном КО.

Закон сохранения энергии для i-того контрольного объема (рис.1) принимает вид:

$$\sum_k u_{ik} \cdot \frac{dm_{ik}}{d\tau} + \left(\sum_k m_{ik} \cdot c_{v_k}\right) \cdot \frac{dT_i}{d\tau} + \Delta u_{исп} \cdot \frac{dm_{исп_i}}{d\tau} + \Delta u_{сг} \cdot \frac{dm_{сг_i}}{d\tau} =$$

$$= \sum_{j=1}^{n_v} \lambda_{ij} \cdot \frac{T_i - T_j}{S_{ij}} \cdot F_{ij} + \sum_{j=1}^{n_w} \alpha_{ij} \cdot \left(T_i - T_j\right) \cdot F_{ij} + \sum_{j=1}^{n_{vv}+n_{ww}} \psi_{ij} \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_j^4 - T_i^4\right) - \qquad (1)$$

$$- \frac{m_i \cdot R_i \cdot T_i}{V_i} \cdot \frac{dV_i}{d\tau} + \sum_{j=1}^{n_v} \left[\sum_k \left(c_{p_k} \cdot T_j \cdot \frac{dm_{-k}}{d\tau} - c_{p_k} \cdot T_i \cdot \frac{dm_{-k}}{d\tau}\right)\right]_{ij},$$

где n_v – число КО, примыкающих к i-тому КО; n_w – число участков поверхности, примыкающих к i-тому КО; n_{vv} – число КО в пространстве КС; n_{ww} – число участков поверхности КС; k – число компонентов рабочего тела; m_+ и m_- - соответственно подводимые от V_j к V_i и отводимые от V_i к V_j массы рабочего тела;

Остальные обозначения в (1) являются общепринятыми в термодинамике и в теории ДВС.

Расчет локальных нестационарных температур в КС ведется в два этапа. На первом этапе считается, что контрольный объем имеет непроницаемые перегородки, т.е. контрольный объем рассматривается как закрытая термодинамическая система. Второй этап расчета предусматривает выравнивание давлений по всему объему камеры, т.е. перегородки мгновенно убираются, и из-за разницы давлений идет массообмен между контрольными объемами, которые рассматриваются уже как открытые термодинамические системы.

Подвод (отвод) теплоты к контрольному объему осуществляется теплопроводностью, конвекцией и радиацией.

Система дифференциальных уравнений (1) решается относительно температуры контрольного объема T_i, т.е. она позволяет получить значения локальных температур в объеме камеры сгорания.

На рис.4 показан один из примеров расчета локальных температур рабочего тела в КС.

<u>В третьей главе</u> изложен метод расчета локальных образований оксидов азота на основе механизма Я.Б. Зельдовича.

Для расчета образования токсичных веществ необходимо в каждый момент процесса сгорания знать состав продуктов сгорания. Рассчитать кинетику процесса сгорания сложных по составу углеводородных топлив практически невозможно. Поэтому в расчетах обычно принимают равновесный состав продуктов сгорания. Такой подход обоснован тем, что скорость сгорания углеводородных топлив очень высока по сравнению с реакцией окисления атмосферного азота кислородом, приводящей к образованию NO.

Для расчёта состава продуктов сгорания с учетом диссоциации найдены константы равновесия тех реакций, которые учитываются в расчёте и составлены следующие уравнения: 1) баланса элементов, входящих в горючую смесь; 2) полного давления.

Исходя из того, что при использовании закона действующих масс рассматриваются обычно только компоненты, находящиеся в газовой фазе, в состав продуктов сгорания (с учетом продуктов диссоциации) будут входить следующие 11 компонентов: CO_2,CO, H_2O, OH, NO, H_2, N_2, O_2, H, O, N.

Таким образом, имеем систему из 11 нелинейных алгебраических уравнений для определения 11 неизвестных. Для их решения был применен метод Рунге-Кутта.

В качестве основных, для расчета образования оксидов азота, приняты следующие реакции цепного механизма:

$$N_2 + \dot{O} \underset{k_{1R}}{\overset{k_{1V}}{\Leftrightarrow}} NO + \dot{N}; \qquad O_2 + \dot{N} \underset{k_{2R}}{\overset{k_{2V}}{\Leftrightarrow}} NO + \dot{O}; \qquad \dot{N} + \dot{O}H \underset{k_{3R}}{\overset{k_{3V}}{\Leftrightarrow}} NO + \dot{H}.$$

По закону действующих масс для этих реакций уравнение для скорости образования NO

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = k_{1V} C_O C_{N_2} - K_{1R} C_{NO} C_N + K_{2V} C_N \cdot C_{O_2} - \\ - K_{2R} C_{NO} C_O + k_{3V} C_N C_{OH} - k_{3R} C_{NO} C_H \qquad (2)$$

Подбор коэффициентов химических реакций – вопрос сложный. Специальная литература и периодические издания по константам химических реакций содержат противоречивые данные. Поэтому значение констант следует (по возможности) брать из источников, рассматривающих реакции горения в условиях, близких ДВС.

Экспериментальные исследования концентрации оксидов азота в выпускных газах поршневого двигателя были проведены в лаборатории кафедры Э2 МГТУ им. Н.Э. Баумана. В целях измерения токсичных составляющих выпускных газов испытательный стенд был оснащен дополнительным блоком измерения (рис.5).

Для проверки адекватности разработанной и предложенной в данной работе математической модели расчета оксидов азота использовались опытные данные, полученные по результатам измерения оксидов азота перед катализатором. На рис.6 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, которое показывает, что разработанный метод расчета адекватно отражает реальный процесс образования оксидов азота. Кроме того, были проведены расчетные исследования двигателей ЯМЗ, КамАЗ, Д-240 и др. Во всех случаях были получены хорошие совпадения с опытными данными.

Четвертая глава посвящена определению содержания оксидов азота в продуктах сгорания быстроходных двигателей, а также их уменьшению путем воздействия на рабочий процесс.

Метод расчета локальных нестационарных температур в камере сгорания дизеля подразумевает наличие поршня с плоским огневым днищем. В реальных двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива чаще всего используются камеры в поршне, или камеры типа Гессельмана. Очевидно, что учет реальных геометрических конфигураций таких камер (или даже вихревых и форкамер) не вносит принципиальных изменений в метод расчета, однако существенно усложняет расчет взаимных поверхностей обмена излучением. Сложность заключается в том, что этот

параметр является функцией формы поверхностей камеры сгорания, между которыми идет теплообмен излучением, их размеров и расположения в пространстве камеры сгорания. С другой стороны, можно было отказаться от расчета взаимных поверхностей обмена излучением, как это делается в большинстве работ по теории рабочих процессов в ДВС, и произвести расчет излучения с грубым приближением, что приведет, по крайней мере, к двум нежелательным последствиям: 1) значения локальных температур (и как следствие, значения локальных концентраций оксидов азота) будут определены с существенными неточностями; 2) так же со значительными неточностями будет производиться расчет теплообмена в цилиндре. В связи с этим вводится понятие эквивалентной камеры сгорания, позволяющее произвести замену реальной конструкции камеры сгорания эквивалентной с плоским огневым днищем поршня. Эквивалентной будем называть камеру сгорания с плоским днищем поршня, которая имеет точно такую степень сжатия как реальная камера сгорания и при этом обеспечивает неизменность протекания давления и температуры по углу поворота коленчатого вала при неизмененных цикловой подаче топлива и коэффициенте избытка воздуха. Очевидно, что при переходе к эквивалентной камере сгорания индикаторные и эффективные показатели ДВС, такие как мощность, расход топлива и др. остаются неизменными.

Локальные температуры, полученные в результате расчетов, существенно отличаются от осредненной по цилиндру температуры, полученной, как правило, путем пересчета индикаторной диаграммы давления. Очевидно, что концентрации оксидов азота выше в зонах с высокой температурой. Показано, что общая концентрация оксидов азота, определенная суммированием концентраций каждой зоны больше чем рассчитанная по «индикаторной» температуре для всего цикла. Следовательно, расчет на основе многозонной модели, дает более точное представление о токсичности двигателя.

На основе разработанного метода были проведены численные эксперименты, цель которых заключалась в исследовании влияния на образование оксидов азота таких конструктивных и регулировочных факторов, как угол опережения впрыскивания, степень сжатия, диаметр соплового отверстия, послойное смесеобразование и др. Результаты исследования приведены на рис.7 и 8. Как видно, разработанный метод правильно отражает влияние вышеуказанных факторов на образование оксидов азота, что позволяет рекомендовать его для практического использования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета локальных концентраций оксидов азота в объеме камеры сгорания и их изменений по ходу рабочего процесса дизеля, отличавшиеся от существующих тем, что количество выделенных расчетных зон практически неограниченно.
2. Предложенный метод расчета позволяет определить локальные образования оксидов азота в зависимости от таких реальных факторов, как распределение топлива по объему камеры сгорания, вихревое движение заряда в камере, скорость испарения и скорость сгорания, и, наконец, локальные температуры в пространстве цилиндра дизеля, существенно отличавшиеся от «индикаторной» температуры рабочего тела.
3. В результате проведенного анализа определены численные значения коэффициентов и энергии активации для выражения закона Аррениуса. Результаты расчетов, проведенных на их основе, а также их экспериментальная проверка, показывают, что они в целом правильно отражают особенности сложных процессов образования оксидов азота и могут быть рекомендованы для рассмотренных выше дизелей.
4. В целях исследования концентраций вредных компонентов отработавших газов двигателей была модернизирована экспериментальная установка с

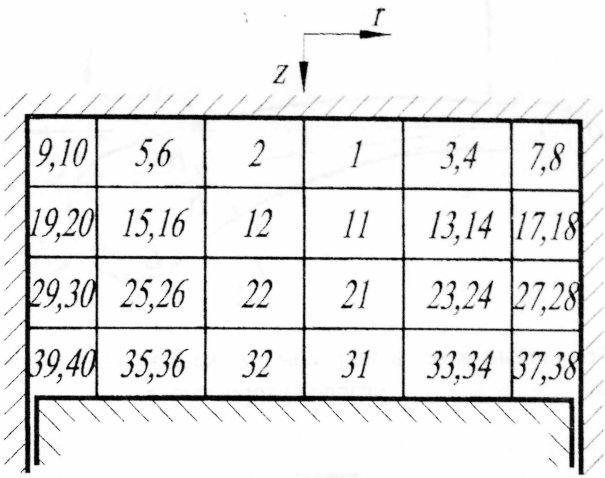
дизелем 2Ч 8,5/11. В частности она оснащена оборудованием для измерения концентраций CO, CH и NO_x, а также дымности выпускных газов. Разработан метод экспериментального исследования суммарных концентраций оксидов азота, а также CO и CH, обеспечивающий получение опытных данных, необходимых для проверки адекватности предложенного метода расчета.

5. Сравнение результатов расчета с опытными данными, полученными на специальной экспериментальной установке с двигателем 2Ч 8,5/11, а также с опытными данными, полученными другими исследователями на двигателях ЯМЗ подтверждает достоверность предпосылок и гипотез, принятых при разработке метода расчета концентраций оксидов азота.
6. Предложенный метод позволяет прогнозировать локальные и суммарные концентрации оксидов азота в продуктах сгорания перспективных двигателей на стадии их проектирования, оценить уровень токсичности существующих дизелей, не прибегая к дорогостоящим экспериментам, тем самым позволяет снизить материальные затраты и сроки, необходимые для экологической диагностики двигателя. Кроме того показано, что метод может быть использован для приближенной оценки концентрации [NO_x] в бензиновых ДВС с непосредственным впрыскиванием.
7. Исследования, проведенные на основе разработанного метода показывают, что концентрацию оксидов азота в дизелях с непосредственным впрыскиванием топлива можно снизить путем: 1) уменьшения угла опережения впрыскивания (до 20%); 2) уменьшения степени сжатия (до 10%); 3) уменьшения диаметра соплового отверстия (до 30%); 4) применения расслоения заряда (до 35%) (приведенные численные данные относятся к типам дизелей, рассмотренных в диссертационной работе).

8. Предложенный метод расчета может быть рекомендован для практического использования заводами-изготовителями дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Кавтарадзе Р.З., Голосов А.С. Расчет содержания оксидов азота в камере сгорания дизеля на основе многозонной модели рабочего процесса // ДВС двадцать первого века: Материалы всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок.- С.-Петербург, 2000.- С. 11-12.
2. Кавтарадзе Р.З. и др. Экспериментальное исследование теплового состояния поршня быстроходного дизеля / Р.З. Кавтарадзе, З.Р. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, А.С. Голосов // Судостроение, судоремонт и техническая эксплуатация флота.- С.-Петербург, 2002.- Выпуск 4.- С.61-63.
3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С. Анализ трехмерного теплового состояния поршня двигателя с применением экспериментальных граничных условий // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену.- М., 2002.- Т.7.- С. 135-138.
4. Голосов А.С., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О. Расчетно-экспериментальное исследование локальных температур и локальных концентраций оксидов азота в камере сгорания дизеля // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену.- М., 2002.- Т.8.- С. 114-117.



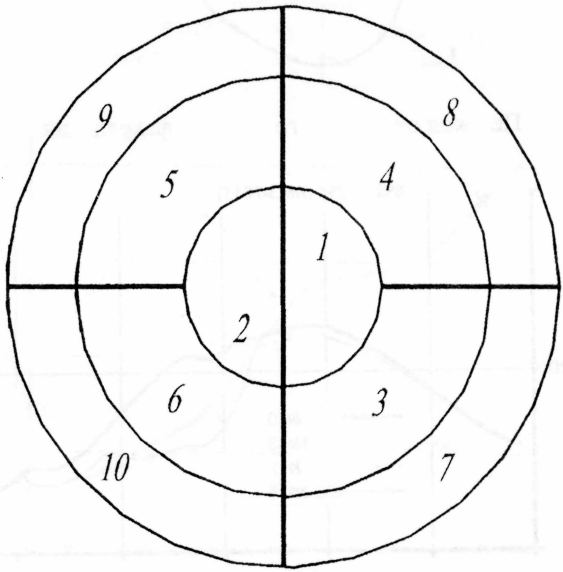


Рис.1. Представление объема цилиндра дизеля в виде конечного числа контрольных объемов

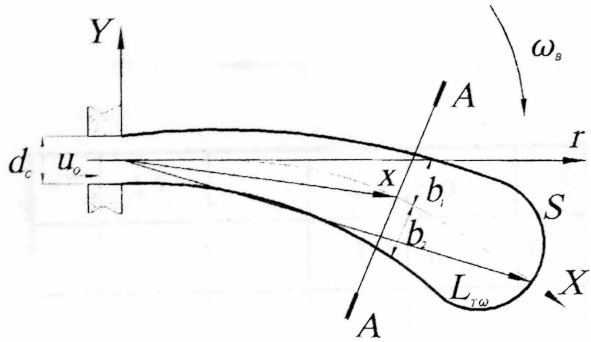


Рис.2. Топливный факел в вихревом потоке воздуха, вращающемся с угловой скоростью $\omega_в$

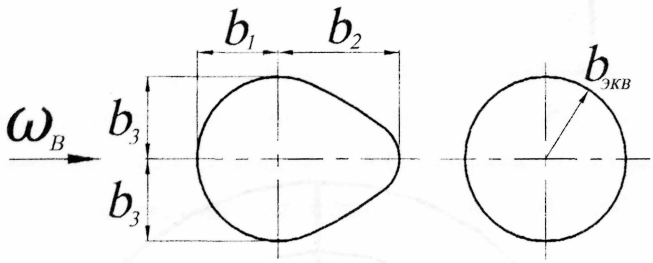


Рис. 3. Переход от реального сечения факела к эквивалентному

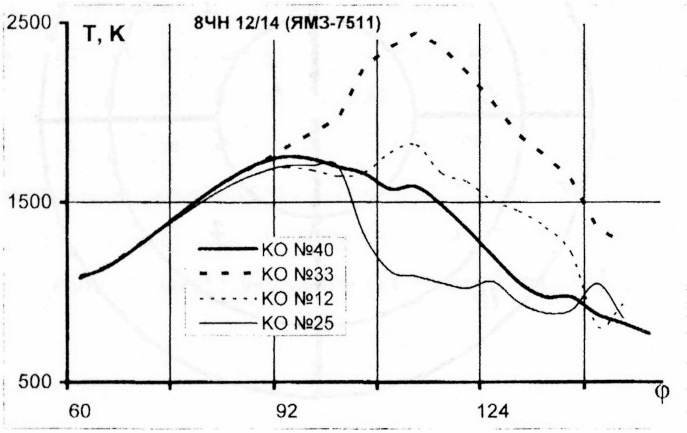


Рис.4. Локальные температуры рабочего тела в камере сгорания

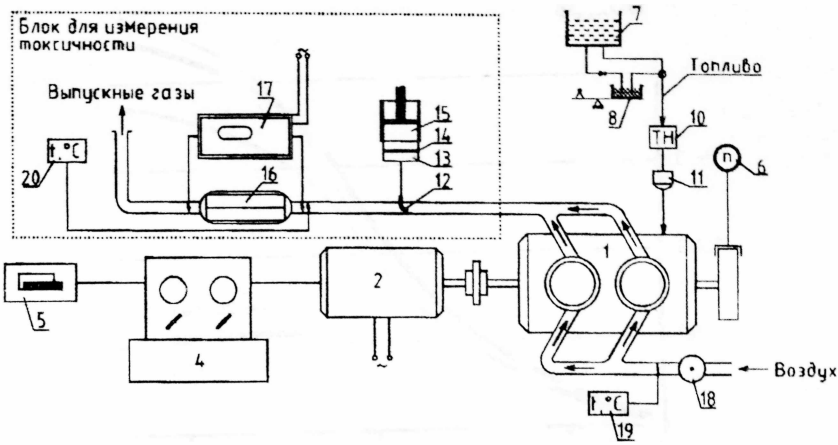


Рис.5. Принципиальная схема экспериментальной установки.
1-ДВС 2Ч 8,5/11; 2-Электротормоз (генератор переменного тока); 3-Муфта; 4-Пульт управления; 5-Реостат; 6-Тахометр; 7-Топливный бак; 8-Мерная емкость; 9-Перепускной кран; 10-Топливный насос; 11-Топливный фильтр; 12-Газоотборник; 13-Адаптер; 14-Фильтровальная бумага; 15-Поршневой дозатор; 16-Катализатор; 17-Газоанализатор Testo 350; 18-Расходомер; 19-Термопара; 20-Термопара.

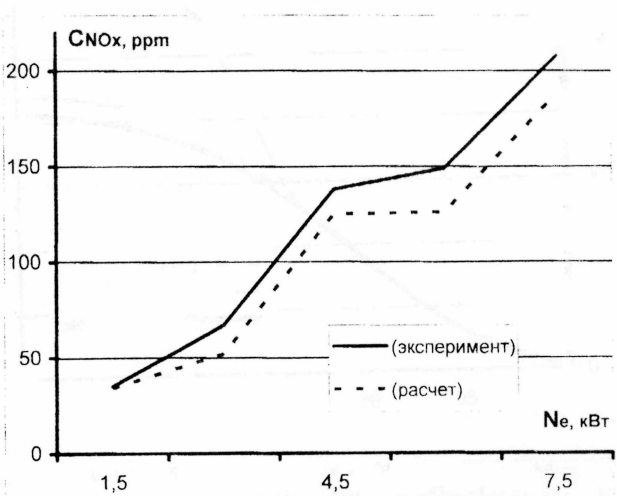


Рис.6. Изменение концентрации оксидов азота в зависимости от мощности двигателя 2Ч 8,5/11

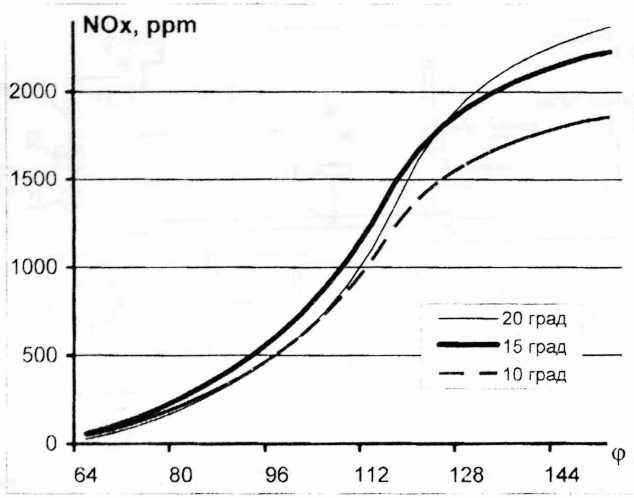


Рис.7. Концентрации оксидов азота для двигателя 8ЧН 12/14 (ε=17, n=1900 мин $^{-1}$, Ne = 295 кВт, g_e=201 г/кВт·ч) в зависимости от угла опережения впрыскивания топлива 10, 15 и 20 градусов

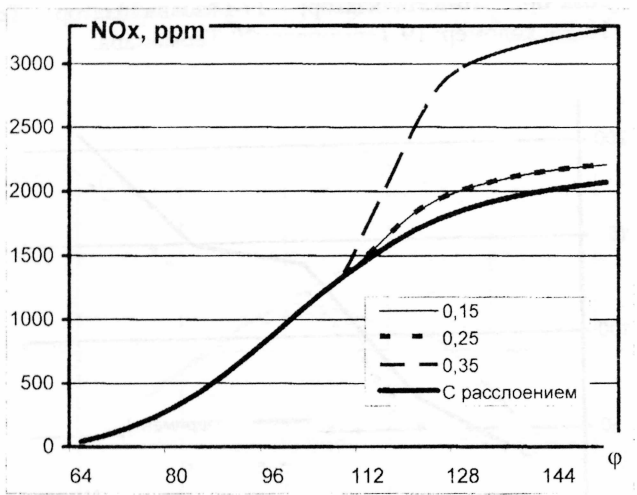


Рис.8. Концентрации оксидов азота для двигателя 8ЧН 12/14 (ε=17, n=1900 мин $^{-1}$, N_e = 295 кВт, g_e=201 г/кВт·ч) в зависимости от диаметра сопловых отверстий 0.15, 0.25, 0.35 мм и для двигателя с расслоением заряда

Подписано в печать 03.01.2003 г. Формат 60x90, 1/16.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 26

Отпечатано в ООО "Фирма Блок"
107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1. т. 264-30-73
www.blok01centre.narod.ru
Изготовление брошюр, авторефератов, переплет диссертаций.